

HANNU AURINKO

## Selvitys rengasrouheen käyttö- mahdollisuuksista rata- ja tierakenteissa

KIRJALLISUUSSELVITYS





Hannu Aurinko

# Selvitys rengasrouheen käyttömahdollisuuksista rata- ja tierakenteissa

Kirjallisuusselvitys

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 42/2012

Liikennevirasto

Helsinki 2012

*Kannen kuva: Hannu Aurinko*

Verkkojulkaisu pdf ([www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi))

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-194-8

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 020 637 373



**Hannu Aurinko: Selvitys rengasrouheen käyttömahdollisuuksista rata- ja tierakenteissa.** Liikennevirasto, rakennuttamisosasto. Helsinki 2012. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 42/2012. 50 sivua ja 1 liite. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-194-8.

**Avainsanat:** rengasrouhe, rengasgranulaatti, routaeriste, hydraulinen johtavuus, ratarakenne, kevennysrakenne, meluvalli, kierrätysrengas, ratapölkky, tukikerros

## Tiivistelmä

Kirjallisuusselvityksen tavoitteena oli etsiä kansainvälisestä kirjallisuudesta tietoa kierrätysrengasmateriaalien hyödyntämisestä tie- ja ratarakenteissa. Lisäksi tarkasteltiin erilaisten kierrätysrenkaista toteutettujen rakenneratkaisujen sovellettavuutta suomalaiseen rata- ja tierakentamiseen. Osana kirjallisuusselvitystä tarkasteltiin sitä, löytyykö ratkaisumallia alentaa tai estää rengasrouhe tai -granulaattimateriaalien avulla paannejään aiheuttamia vaikutuksia raideliikenteeseen.

Rengasrouhe- ja rengasgranulaattimateriaalia on yleensä käytetty korvaamaan luonnon kiviainesta. Tyypillinen käyttökohde on rakenne, jonka alapuolella olevan maapohjan kantavuus on heikko ja jossa rengasrouhe on keveytensä ansiosta soveltunut käytettäväksi rakenteeseen. Kierrätysrengasmateriaaleilla on kivennäismaa-ainekseen verrattuna suuri huokostilavuus, mistä johtuu suuri kokoonpuristuvuus kuormituksen vaikutuksesta. Suuresta kokoonpuristuvuudesta johtuen rengasrouhetta on käytetty alentamaan routimisen vaikutuksia tierakenteissa.

Toisin kuin kitka- ja koheesiomaalajeille, kierrätysrengasmateriaaleille ei ole kansainvälisesti hyväksyttyjä geoteknisiä mitoitusperusteita. Mitoitusperusteiden puuttumisen takia kierrätysrengasmateriaaleja on käytetty varsin yksinkertaisiin käyttökohteisiin. Rengasrouhetta ja -granulaattia on viime aikoina alettu soveltaa haasteellisempiin ratkaisuihin, kuten liikenteen aiheuttaman melun ja värinän vaimentamiseen. Kierrätysrengasmateriaalien ominaisuuksia voidaan muuttaa tai parantaa käyttämällä lisäaineita kuten kiviainesta, sementtiä tai väriainetta. Lisäaineiden käyttämisen tavoitteena on yleensä alentaa huokoisuutta, mikä pienentää kokoonpuristuvuutta. Väriaineen lisäämisellä muutetaan materiaalien ulkonäköä. Värjätty rengasgranulaattia käytetään urheilukenttien pinnoitteena tai koristemateriaalina.

Rengasrouheen käyttäytymisessä ratarakenteessa, tukikerroksen alapuolella, keskeisimmät vaikuttavat materiaaliominaisuudet tai tekijät ovat tiheys, kokoonpuristuvuus, rakenteen hydraulinen johtavuus, huokoisuus, lämmönjohtavuus ja tiivistyvyys. Tässä selvityksessä tarkastellaan rengasrouheen käyttäytymistä ratapenkereessä. Tarkastelun tueksi VTT teki laskentoja kolmelle paksuudeltaan erilaiselle rengasrouhekerrokselle, viidelle eri pengerpaksuudelle ja viidelle kumirouhekerroksen kimmomoduulille. Laskennan reunaehdoksi asetettiin maksimissaan 5 mm:n suuruinen penkereen yläpinnan kimmoinen maksimisiirtymä.

Kirjallisuusselvityksen perusteella rengasrouheesta tai rengasgranulaatista ei tunnetta yksiselitteisesti läheskään kaikkia rata- ja tierakentamiskohteissa vaadittavia materiaaliominaisuustietoja. Materiaaliominaisuuksien tunteminen on välttämätöntä, ennen kuin voidaan luotettavasti vastata kysymykseen, soveltuvatko kierrätysrengasmateriaalit kulloiseenkin käyttökohteeseen. Kirjallisuustiedon perusteella on todennäköistä, että pystytään löytämään sellaisia teknisesti toteutuskelpoisia rakenneratkaisuja, joita voidaan soveltaa rata- ja tierakenteissa. Käyttö edellyttää kuitenkin jatkotutkimuksia.

**Hannu Aurinko: Utredning av möjligheterna att använda däckklipp vid ban- och vägbygge.** Trafikverket, byggherreverksamhet. Helsingfors 2012. Trafikverkets undersökningar och utredningar 42/2012. 50 sidor och 1 bilaga. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-194-8.

## Sammanfattning

Syftet med litteratursökningen var att ur internationell litteratur söka information om utnyttjande av återvinningsbart däckmaterial vid väg- och banbygge. Dessutom granskades hur olika konstruktionslösningar av återvinningsbara däck lämpar sig för användning vid ban- och vägbygge i Finland. Som en del av litteratursökningen granskades huruvida man med hjälp av däckklipp eller granulatmaterial kan minska eller förhindra svallisens inverkan på den spårbundna trafiken.

Däckklipp- och däckgranulatmaterial har i allmänhet använts för att ersätta naturens eget stenmaterial. Ett typiskt användningsobjekt är en konstruktion där bärförmågan hos den underliggande jordmånen är svag och där däckklipp tack vare sin lätthet lämpat sig för användning i konstruktionen. Återvinningsbart däckmaterial har i jämförelse med mineraljord en stor porositet, vilket leder till en stor kompression under belastning. På grund av en stor kompression har däckklipp använts för att minska tjälens inverkan i vägkonstruktioner.

Avvikande från friktions- och kohesionsjordarter, har återvinningsbart däckmaterial inte några internationellt godkända geotekniska dimensioneringsgrunder. På grund av avsaknaden av dimensioneringsgrunder har återvinningsbart däckmaterial använts i relativt enkla användningsobjekt. Däckklipp och -granulat har den senaste tiden börjat användas i allt mer krävande lösningar, såsom för att dämpa buller och vibration orsakat av trafiken. Egenskaperna hos återvinningsbart däckmaterial kan ändras eller förbättras genom att tillföra stenmaterial, cement eller färgämnen. Syftet med att använda tillsatser är i allmänhet att minska porositeten, vilket minskar kompressionen. Genom användning av färgämne ändras materialets utseende. Färgat däckgranulat används som beläggning på idrottsplaner eller som prydnadsmaterial.

De viktigaste materialegenskaperna eller faktorerna som inverkar på hur däckklippet beter sig i bankonstruktioner under stödsnittet är täthet, kompression, konstruktionens hydrauliska konduktivitet, porositet, värmeledningsförmåga och komprimeringsförmåga. I denna utredning granskas däckklippets beteende i banvallar. Som stöd för analysen gjorde VTT beräkningar för däckklippkikt av tre olika tjocklekar, banvallar av fem olika tjocklekar och för fem elasticitetsmoduler av gummikrosskikt. Som ramvillkor för beräkningen ställdes en elastisk förskjutning på max. 5 mm av banvallens övre skikt.

På basis av litteratursökningen känner man inte entydigt till ens närapå alla de materialegenskaper hos däckklipp eller däckgranulat som krävs för användning i ban- och vägbyggnadsobjekt. Det är nödvändigt att känna till materialegenskaperna innan man på ett tillförlitligt sätt kan svara på frågan om huruvida återvinningsbart däckmaterial lämpar sig för respektive användningsobjekt. Enligt uppgifterna i litteraturen är det sannolikt att man kan finna sådana tekniskt genomförbara konstruktionslösningar som kan användas vid ban- och vägbygge. Användning av dem förutsätter emellertid ytterligare forskning.

**Hannu Aurinko: The literature review of possibilities for shredded tire use in railway and road structures.** Finnish Transport Agency, Construction Management. Helsinki 2012. Research reports of the Finnish Transport Agency 42/2012. 50 pages and 1 appendix. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-194-8.

## Summary

The objective of the literature review was to search from the international literature knowledge of recycled tire materials reclaim in railway and road structures. In addition, there was also aim to research different realized application for recycled tire materials and the applications suitability to railway and road structures in Finland. A part of this literature review was look at solutions that could help to reduce or refuse frosting problems in rail traffic.

Tire shred and rubber granulate materials are typically used to replace virginal soil materials and in the lightweight filling structures. Recycled tire materials bring these applications to bear because tire shred and rubber granulate materials have large porosity and in addition, this follow from large compaction which returns to the same porosity after stress.

Tire shred and rubber granulate materials have no international geotechnical instructions for dimensioning like friction or cohesion soil materials. Partly these reasons recycled tire materials have used in simple applications. Recently have brought tire shreds and granulates to bear challenging applications like reducing traffic noise or vibration. Recycled tire material properties can be change or improve by using additive materials like soil, cement or colorants. The aim of additive material use is usually to reduce the porosity of the tire shreds that reduces the large compaction capacity. By using the colorants, the granulate appearance can change e.g. if the granulate are used in sport field surface or decoration material.

The main linchpins by using tire shred under the railway embankment are density, elastic modulus  $E$ , compaction, hydraulic conductivity, porosity and thermal conductivity. In support of the literature review, VTT made the estimation for three different rubbers granulate layer thickness, five different embankment thicknesses and five different rubbers granulate elastic modulus. The boundary condition of the estimation was maximum five mm compaction of the embankment surface.

According to this literature review, it cannot unequivocal determine anywhere near all material characteristics for railway or road structures applications. It is necessary to determine and know all tire shred and rubber granulate material characteristics before it can make certain recycled tire materials suitability for railway and road structures. The betting is that by force of additional search and laboratory tests it can be find technical applications that bring railway or road structures to bear.

## Esipuhe

Selvitys rengasrouheen käyttömahdollisuuksista tie- ja ratarakenteissa toteutettiin Liikenneviraston, Rengaskierrätys Oy:n ja Kuusakoski Oy:n toimeksiannosta Laatu-insinöörit Oy:ssä.

Raportin laati dipl.ins. Hannu Aurinko ja työtä ohjaavaan ryhmään kuuluivat Erkki Mäkelä Liikennevirastosta, Risto Tuominen Rengaskierrätys Oy:stä, Janne Huovinen Kuusakoski Oy:stä, Antti Nurmikolu Tampereen teknillisestä yliopistosta ja Jouko Törnqvist Teknologian tutkimuskeskus VTT:stä.

Helsingissä marraskuussa 2012

Liikennevirasto  
Rakennuttamisosasto

# Sisällysluettelo

1	JOHDANTO .....	9
2	RENGASROUHEEN JA -GRANULAATIN KÄYTTÖKOhteita TIE- JA RATARAKENTEISSA .....	11
2.1	Käsitteitä .....	11
2.2	Yleistä .....	11
2.3	Rengasrouheen hyödyntäminen tierakentamisessa .....	14
2.3.1	Rengasrouheen käyttäminen kevennysrakenteena .....	14
2.3.2	Rengasrouheen käyttäminen routaeristeenä .....	15
2.3.3	Granulaatin hyödyntäminen asfaltin lisäaineena .....	17
2.3.4	Rengasrouheen käyttäminen meluvallissa .....	17
2.4	Rengasrouheen ja -granulaatin hyödyntäminen ratarakenteissa .....	18
2.4.1	Raideliikenteen aiheuttaman tärinän vaimentaminen .....	18
2.5	Lisäaineiden vaikutus rengaskierrätysmateriaalien ominaisuuksiin .....	20
2.5.1	Kiviaineksen vaikutus rengaskierrätysmateriaalien ominaisuuksiin ...	20
2.5.2	Sementin vaikutus rengaskierrätysmateriaalien ominaisuuksiin .....	20
2.6	Muita käyttömahdollisuuksia .....	21
2.6.1	Veden johtaminen kuivatusrakenteena .....	21
2.6.2	Värjätyn granulaatin hyödyntäminen .....	21
2.6.3	Rengasrouhe ja -granulaatti rakennekerrosten alustana .....	22
2.6.4	Ratapölkkyt kierrätysmateriaalista .....	23
3	RENGASROUHEEN JA -GRANULAATIN MATERIAALIOMINAISUUDET .....	25
3.1	Yleistä .....	25
3.2	Luokitusominaisuudet .....	25
3.2.1	Tiheys ja tiheyden määrittäminen .....	25
3.2.2	Tilavuuspaino .....	26
3.2.3	Rakeisuus .....	27
3.2.4	Huokoisuus .....	27
3.3	Hydrauliset ominaisuudet .....	29
3.4	Lujuus ja kokoonpuristuvuusominaisuudet .....	30
3.4.1	Leikkauslujuus .....	30
3.4.2	Kokoonpuristuvuus .....	31
3.4.3	Kimmomoduuli .....	32
3.5	Lämmönjohtavuus .....	34
4	RENGASROUHEEN KÄYTTÄMINEN RATAPENKEREEN TUKIKERROKSEN ALAPUOLELLA .....	36
4.1	Yleistä .....	36
4.2	Rengasrouheen materiaaliominaisuuksien vaikutuksia ratarakenteisiin .....	36
4.3	Rengasrouherakenteen vaikutus mitoituslaskelmiin .....	40
4.3.1	Rengasrouheen fraktionvalintaperusteet .....	41
4.3.2	Fraktion vaikutus kimmomoduuliin, kokoonpuristuvuuteen ja huokoisuuteen .....	41
4.3.3	Hydraulinen johtavuus .....	42
4.3.4	Materiaalin säilyminen .....	42
4.3.5	Käytännön rakennettavuus .....	42
4.3.6	Selvitettäväksi jääviä tekijöitä .....	42
5	YHTEENVETO .....	45

LÄHTEET .....	47
---------------	----

#### LIITTEET

Liite 1	Kierrätysrengasmateriaalien soveltuvuus InfraRYL 2006 -litteroinnin mukaan
---------	--

# 1 Johdanto

Käytettyjen renkaiden uusiokäytön mahdollisuuksia ja hyödyntämistä erilaisissa rakenteissa on tutkittu 1980-luvun alusta lähtien. Laajamittainen uusiokäyttö alkoi 1990-luvulla. Euroopan Unionin alueella vuosina 1999 ja 2000 astui voimaan direktiivejä, jotka velvoittivat rengasalan toimijat kierrättämään ja uusiokäyttämään käytetyt renkaat (EC 1999/31; EC 2000/53; EC 2000/76). Tämä on johtanut erilaisten sovelluskohteiden testaamiseen ja tutkimiseen. Näiden tukemana tänä päivänä kierrätysrengasmateriaaleja käytetään varsin moniin eri käyttötarkoituksiin.

Renkaat sisältävät luonnonkumia ja synteettistä kumia, jotka ovat öljyn ja kaasun yhdisteitä. Tässä kirjallisuusselvityksessä käydään läpi rengasrouheen ja -granulaatin yleisiä ja teknisiä ominaisuuksia sekä niiden vaikutusta kierrätysrengasmateriaalien käyttäytymiseen eritilanteissa ja olosuhteissa tie- ja ratarakentamisen kohteissa. Työn tavoitteena oli kartoittaa mitä sovellutuksia voitaisiin käyttää suomalaisissa tie- ja ratarakentamisen hankkeissa. Kirjallisuusselvityksessä on tarkasteltu myös rengasrouheen soveltuvuutta alentaa paannejään muodostumista ratapenkereen alaosaan. Paannejää aiheuttaa ratapenkereen yläpinnan routanousua ja sitä kautta vaikuttaa raideliikenteeseen.

Rengasrouhetta ja rengasgranulaattia on tyypillisesti käytetty korvaamaan luonnon kivennäismaa-ainesta tilanteissa, joissa maapohjan kantavuus on heikko tai rengasrouheella keveytensä ansiosta voidaan korvata maa-ainesta. Kierrätysrengasmateriaalien pienen lämmönjohtavuuden ansiosta sitä on käytetty myös routasuojauksiin. Rengasrouheella on suuri hydraulinen johtavuus ja tämän takia sitä on käytetty kaatopaikoilla kuivatus- ja kaasunkeräysjärjestelmissä veden ja kaasun johtamiseen. Kierrätysrengasmateriaaleilla on kivennäismaa-ainekseen verrattuna suuri huokositilavuus, mistä johtuu suuri kokoonpuristuvuus kuormituksen vaikutuksesta. Kokoonpuristuma tyypillisesti palautuu kuormituksen poistuttua takaisin aikaisempaan huokositilavuuteen.

Kierrätysrengasmateriaaleille ei ole olemassa kansainvälisiä geoteknisiä mitoitusperusteita kuten kitka- ja koheesiomaalajeille on määritetty. Tämän vaikutuksesta kierrätysrengasmateriaaleja on käytetty varsin yksinkertaisiin käyttökohteisiin, kuten meluvalleihin, joissa kierrätysrengasmateriaalin tärkein ominaisuus on sen keveys. Viime aikoina rengasrouhetta ja -granulaattia on alettu soveltaa haasteellisempiin ratkaisuihin. Kirjallisuudessa on esimerkkejä rakenteista, joilla on alennettu liikenteen aiheuttaman melun ja värinän vaikutuksia ympäristöön. Lisäksi granulaattifraktioista on kehitetty erilaisia väri- ja rakennesovelluksia, joita on käytetty koristeena, keinotekonurmikenttien alustana ja tukirakenteena. Rengasrouheen ja rengasgranulaatin ominaisuuksia voidaan muuttaa käyttämällä lisäaineita, joilla vaikutetaan huokoisuuteen ja kokoonpuristuvuuteen.

Kirjallisuustietojen perusteella rengasrouhetta ja -granulaattia on käytetty ratarakenteissa värinän ja melun vaimentamiseen. Kierrätysrengasmateriaalien käyttäminen ratarakenteissa on suunniteltu ja toteutettu hankekohtaisesti. Siksi vain tietty osa toteutetuista ratkaisuista soveltuu käytettäväksi muihin käyttötarkoituksiin, kuten esimerkiksi paannejään aiheuttamien vaikutuksien alentamiseen. Tämän kirjallisuusselvityksen perusteella pystytään nimeämään ne vaikuttavat tekijät, jotka tulee selvittää, ennen kuin voidaan arvioida kierrätysrengasmateriaalien soveltuvuus hankekohtaisesti. Tämän tiedon tukemana pystytään määrittämään tarvittavat jatko-

tutkimukset. Kirjallisuudesta ei löydy sellaisenaan suoraan sovellettavia ratkaisuja raideliikenteeseen. Laboratoriotutkimuksien tulosten ja vallitsevien olosuhteiden simuloinnin avulla pystytään todentamaan tai ennakoimaan, voidaanko löytää teknisesti toteutuskelpoisia rakenneratkaisuja tie- ja ratarakenteisiin.



## 2 Rengasrouheen ja -granulaatin käyttökohteita tie- ja ratarakenteissa

Tässä kirjallisuusselvityksessä on kartoitettu sitä, missä käyttökohteissa rengasrouhetta ja -granulaattia on käytetty Suomessa ja muualla maailmalla. Lisäksi kirjallisuuden perusteella arvioitiin, voidaanko muualla maailmassa käytettyjä rengasrouhetta tai -granulaattimateriaalien ratkaisuja soveltaa sellaisenaan Suomessa. Selvitystyössä pääpaino oli tie- ja ratarakenteissa sekä niiden rakennettuun ympäristöön sovellettavissa käyttökohteissa.

### 2.1 Käsitteitä

Suomessa kierrätysrengasmateriaalista käytetään termejä rengasrouhe ja rengasgranulaatti. Rengasrouhe leikataan kokonaisista käytetyistä renkaista palasiksi, joiden palakoko vaihtelee välillä 50...300 mm<sup>2</sup>. Tyypillisiä rengasrouheen raekokoja ovat 50\*50 mm<sup>2</sup>, 100\*100 mm<sup>2</sup>, 150\*150 mm<sup>2</sup>, 200\*200 mm<sup>2</sup>, 250\*250 mm<sup>2</sup> ja 300\*300 mm<sup>2</sup>. Rengasrouheessa on mukana renkaiden teräsvöitä ja kuitukankaita, joita ei pystytä poistamaan kokonaan yli 50\*50 mm<sup>2</sup>:n kokoisista paloista. Rengasrouheen palakoko ilmoitetaan pinta-alana, jolloin leikatun palan paksuutta ei ilmoiteta.

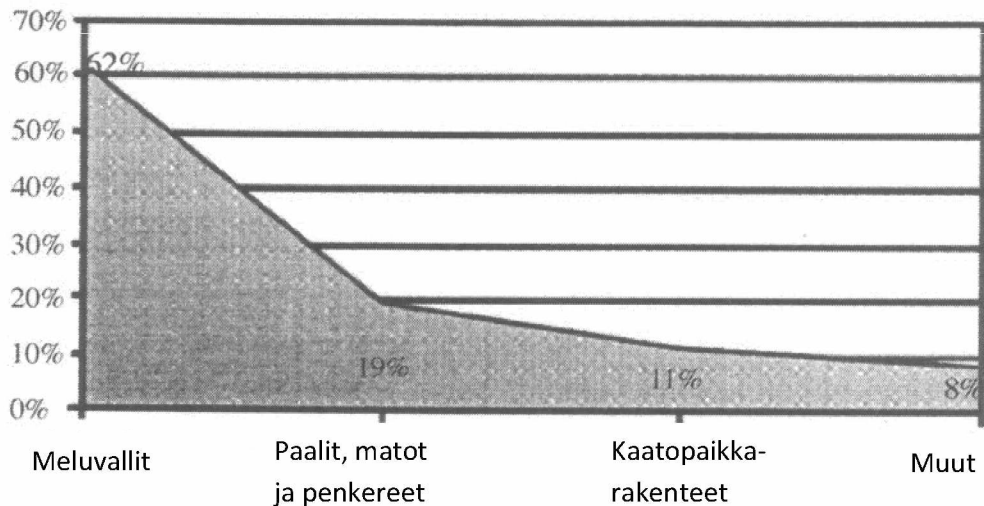
Rengasgranulaatti on raekooltaan 0.5...25 mm:n välillä ja raekokoon numeraalista arvoa voidaan verrata kiviaineksen raekokoon. Granulaatissa ei ole enää mukana renkaassa olevia teräsvahvisteita eikä kuitukankaita, vaan granulaatti on puhdasta kumia. Rengasgranulaattijakeista tyypillisimmin Suomessa käytetään raekokoja 2, 4, 8, 14 ja 25 mm.

Rengasrouheen ja rengasgranulaatin materiaaliominaisuuksia on käsitelty yksityiskohtaisemmin tämän kirjallisuusselvityksen luvussa 3.

### 2.2 Yleistä

Käytettyjen renkaiden kierrätys perustuu valtioneuvoston päätökseen renkaiden kierrätysvelvoitteista. (VNa 1246/1995). Renkaiden uusiokäyttöön ovat vaikuttaneet myös EU:n direktiivi kaatopaikoille sijoitettavasta jätteestä eli ns. kaatopaikkadirektiivi (The Landfill Directive 1999/31), ns. ”romuautodirektiivi (End of Life Vehicles Directive 2000/53/EC) ja direktiivi jätteenpoltosta (Waste Incineration Directive 2000/76/EC). Ennen näiden direktiivien voimaantuloa käytettyjen renkaiden järjestelmällinen kierrätys aloitettiin Suomessa vuonna 1996. Taustalla on Valtioneuvoston päätös, joka velvoittaa renkaantuottajan huolehtimaan siitä, että käytöstä poistetut renkaat päätyvät hyötykäyttöön. Lisäksi valtioneuvoston päätöksessä asetettiin velvoite, että vuoteen 2 000 mennessä 90 % käytöstä poistetuista renkaista on kierrätettävä. Kierrätysvelvoitteen hoitamiseksi joukko rengasalan toimijoita perusti syksyllä 1995 Suomen Rengaskierrätys Oy:n. Kuusakoski Oy operoi nykyisin kierrätystoimintaa.

Käytettyjen renkaiden kierrättäminen ja hyödyntäminen aloitettiin enemmän poliittisin kuin tieteellisin perustein. Osa rengasalan yhtiöistä suoritti jo ennen velvoitteen voimaantuloa kierrätystä markkinoinnillisin perustein ja loi siten itselleen ympäristöä huomioivaa imagoa. Shulman (2004) on määrittänyt, mihin renkaita hyödynnettiin EU:n alueella vuoden 2003 aikana (kuva 1).



Kuva 1. Renkaiden hyödyntämiskohteita EU:n alueella vuonna 2003. (Shulman 2004)

Rengasrouhetta on hyödynnetty erilaisiin kohteisiin, joissa tarvitaan kevyttä materiaalia korvaamaan kiviainesta kosteilla tai heikosti kantavilla pohjarakenteilla. EU:n alueella kierrätysrenkaita on eniten käytetty meluvallissa, johon käytetään 62 % kokonaismäärästä. Paaleihin, suojamattoihin ja penkereiden rakentamiseen on käytetty 19 % kaikista hyödynnettävistä renkaista (Shulman 2004).

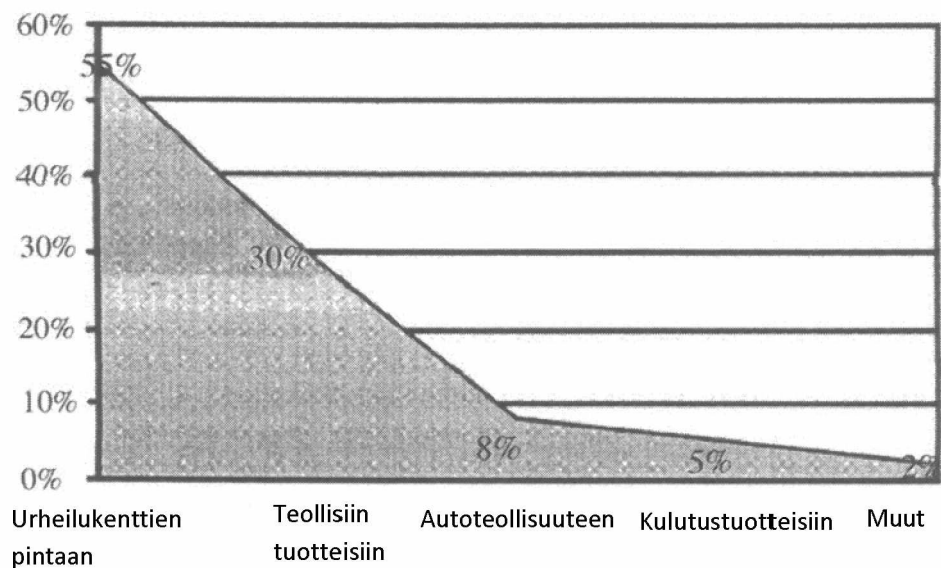
Rengasrouhepaaleja on käytetty lisäämään kantavuutta väliaikaisissa tierakenteissa. Paalit on poistettu rakenteesta liikennöinnin jälkeen. Rengasrouhepaaleja on käytetty myös vähentämään eroosion vaikutuksia luiskarakenteissa. Ankkuroiduilla rengaspaaleilla pystytään sitomaan maa-ainemassoja paikalleen rakenteeseen (Edeskär 2006; Shulman 2004). Kaatopaikkojen rakenteisiin, kuten kuivatus- ja kaasunkeräysrakenteisiin, rengasrouhetta on käytetty 11 % rengasrouhekokonaismäärästä ja loppuosa, 8 %, on käytetty muihin käyttötarkoituksiin (Shulman 2004).

Rengasgranulaattia on käytetty erilaisten kenttien, kuten juoksuratojen, leikkikenttien tai ratsastuskenttien pinnoittamiseen (kuva 2). Näihin käyttökohteisiin käytettiin 55 % rengasgranulaatin kokonaismäärästä EU:n alueella. Teollisissa tuotteissa rengasgranulaattia on käytetty asfaltin lisäaineena alentamaan liirtoa, tärinää ja melua sekä vähentämään tiestä muodostuvaa häikäisyä ja alentamaan renkaasta muodostuvan vesisumun syntymistä. Teollisten tuotteiden osuus kokonaigranulaattimäärästä on 30 %. Lisäksi granulaattia käytetään erilaisiin pinnoituksiin, joiden avulla pystytään suojaamaan mm. betonia halkeamilta, sateelta ja hapoilta (Shulman 2004).



Kuva 2. Rengasgranulaatin hyödyntämistä urheilukentällä.

Kumia ja granulaattia sekoittamalla on saavutettu ominaisuuksiltaan kovempia termoplastisia yhdisteitä, kuten polypropyleeni, polyvinyylikloridi ja polyetyleni. Näitä tuotteita käytetään mm. autoteollisuudessa ja kulutustuotteissa, joiden osuus rengasgranulaatin kokonaismäärästä on yhteensä 13 %. Muihin sovelluskohteisiin rengasgranulaattia käytettiin 2 %:n osuus. (Shulman 2004); (kuva 3)



Kuva 3. Rengasgranulaatin hyödyntämiskohteita EU:n alueella vuonna 2003. (Shulman 2004).

Käytöstä poistettuja renkaita on käytetty EU:n alueella laajasti energiantuotantoon, pääosin polttamiseen. Energiantuotantoon käytettyjen renkaiden määrää ei ole huomioitu edellä mainituissa luvuissa (kuva 2 ja 3). Renkaiden polttaminen on huomattavia sisäisiä eroja EU-maiden välillä, jotka johtuvat pitkälti kansallisesta käytännöstä

ja kierrätyksen järjestämisestä. Pyrolyysissa termisellä käsittelyllä renkaista tuotetaan öljyä, erilaiset hiiliyhdisteitä ja jakeita. Teollisuudessa näitä materiaaleja hyödynnetään mm. hapettavassa ympäristössä. Yleisimmin käytetty on hiilimusta l. carbon black (Myhre & Mackillop 2002).

EU:n alueella vuonna 2004 yhteensä 29 % kaikista renkaista päätyi kaatopaikalle ilman minkäänlaista uusiokäyttöä. Kaatopaikalle vietyjen renkaiden määrää ei ole huomioitu renkaiden kokonaismäärässä (kuva 2 ja 3). Tältä osin tilanne on kuitenkin muuttunut vuoden 2006 jälkeen, koska kaatopaikalle ei saa enää sijoittaa autonrenkaita (Kumar 2007).

## 2.3 Rengasrouheen hyödyntäminen tierakentamisessa

Rengasrouhetta on käytetty tierakentamiskohteissa teknisesti ja mitoituksellisesti yksinkertaisissa rakenteissa. Tähän on vaikuttanut merkittävästi, se ettei geotekniikassa ole yleisesti hyväksyttyjä, tunnettuja ja verifioituja suunnitteluperusteita rengasrouheen käyttämiseen. Geoteknisten suunnitteluparametrien määrittäminen antaisi mahdollisuuksia soveltaa tai tarkastella rengasrouheen soveltuvuutta laajemmin erilaisiin käyttökohteisiin. Toisaalta Euroopassa on vasta kuuden vuoden ajan veloitettu kaikki EU-maat hyödyntämään renkaita uusiokäytössä.

Tyypillisiä rengasrouheen käyttökohteita tierakenteisessa tai tien vaikutusalueella on rakenteiden keventäminen, jossa kivennäismaa-aines korvataan osittain tai kokonaan rengasrouheella. Toinen käyttökohde rengasrouheelle on tien pintarakenteen routanousun alentaminen, jolloin osa tierakenteesta on korvattu rengasrouheella. Lisäksi rengasrouhetta on käytetty melun alentamiseen asfaltin lisäaineena ja meluvälleissä korvaamaan kokonaan tai osittain kivennäismaa-aineksen. Näitä sovellutuskohteita on tarkasteltu lähemmin seuraavissa luvuissa.

Rengasrouheen ympäristövaikutuksia on selvitetty laajasti eri käyttökohteissa ja eri puolilla maailmaa. Kirjallisuuden perusteella rengasrouheesta liuenneiden aineiden määrät ja pitoisuudet ovat olleet hyvin vähäisiä. Rengasrouheesta liuenneiden aineiden pitoisuudet ovat alentuneet ajan funktiona eivätkä mitatut pitoisuudet ole ylittäneet talousvedelle asetettujen laatuvaatimusten ja -suositusten sallittuja pitoisuuksia (Edeskär 2006; Park ym. 2003; Ettala 1998; Park ym. 1996; Humphrey & Eaton 1995). Kierrätysrengasmateriaalien käyttämisessä ei Suomessa edellytetä ympäristölupamenettelyä. Siksi rengasrouhemateriaalia voidaan käyttää tierakentamisessa erilaisissa käyttökohteissa.

### 2.3.1 Rengasrouheen käyttäminen kevennysrakenteena

Tyypillisiä kevennysrakenteita ovat korotetut penkereet tai siltojen tukimuurien täytöt. Kuvassa 4 on Oulusta esimerkki kevennysrakenteesta, jossa sillan tukimuurin päähän kevyenliikenteen väylälle on 400 m matkalle rakennettu kevennys rengasrouheesta. Rengasrouhe soveltuu käytettäväksi paremmin kevyenliikenteen väylällä maantiestöön verrattuna, koska liikenteen aiheuttama kuormitus ei ole rakenteen kantavuuden kannalta merkittävä. Kevennysrakennekohde on 10 vuotta vanha ja silmämääräisessä tarkastelussa pintarakenteessa ei ollut havaittavia muodonmuutoksia. Työkohteessa rakentamisen aikaan vastaavana mestarina ollut Jari Huttunen ker-



toi, että rakentamisessa tulee huomioida rakenteen alkupainuma ja sen vaikutus rengasrouheen tiivistystyön jälkeen rakennettuun kantavaan ja kulutuskerrokseen.

Rengasrouheen ominaisuuksia voidaan muuttaa käyttämällä kivennäismaa-ainesta rengasrouheen seassa, jolloin mm. kimmomoduuli kasvaa ja lisää rakenteen kykyä vastustaa pysyvien muodonmuutosten syntymistä (Humphrey ym. 1993; Kumar 2007). Kevennysrakenteiden toteuttaminen edellyttää yleensä ennakkokokeiden tekemistä, jolloin rakenteen käyttäytymistä voidaan etukäteen simuloida laboratorio-olosuhteissa. Kivennäismaa-aineksen lisääminen muuttaa rengasrouheen huokoisuutta, rakeisuutta ja kokoonpuristuvuutta, jotka vaikuttavat kevennysrakenteen toimivuuteen (Edeskär 2006). Rengasrouheen materiaaliominaisuuksista huokoisuus, rakeisuus ja kokoonpuristuvuus vaikuttavat keskeisimmin rakenteen kykyyn vastustaa pysyviä muodonmuutoksia (Humphrey ym. 1993; Kumar 2007).



*Kuva 4. Oulussa rengasrouheella toteutettu kevennysrakenne, jossa kevyen liikenteen väylällä on 400 m:n matkalla korvattu kivennäismaa-aines rengasrouheella sillan tukimuurista alkaen.*

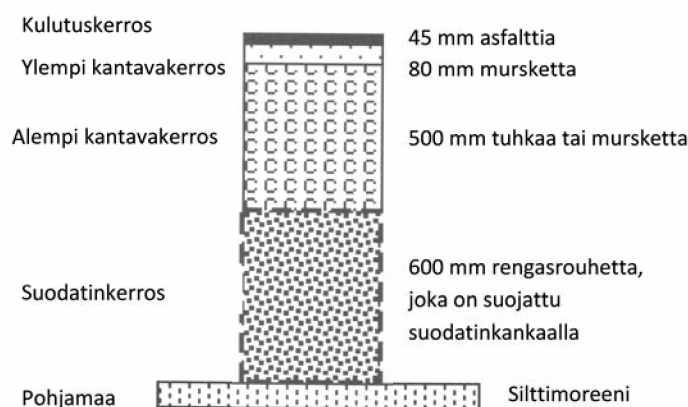
### 2.3.2 Rengasrouheen käyttäminen routaeristeenä

Rengasrouheen hyödyntämistä routaeristeenä on testattu Luulajan teknisen yliopiston ja Mainen yliopiston Yhdysvaltojen pohjoisosassa tekemissä tutkimuksissa. Molemmissa kohteissa, joissa em. tutkimuslaitokset ovat olleet mukana, on toteutettu koerakentamiskohteita. Näissä on käytetty rengasrouhetta erityyppisissä rakennekerroksissa ja eri kuormitusvaikutuksissa.

Pohjois-Ruotsissa lähellä Bodenia koetiellä korvattiin kivennäismaakerros kantavan kerroksen alapuolella 600 mm paksulla rengasrouheella, jonka palakoko oli 50\*50 mm<sup>2</sup>. Rakenteesta on tyyppipoikkileikkaus esitetty kuvassa 5. Koerakenteen tavoitteena oli vähentää routimista kyseisellä tieosalla. Tiellä kuljetettiin mm. puukul-

jetuksia läheiselle sahalle täysperävaunuyhdistelmillä ja muu liikenne oli henkilö- ja kuorma-autoliikennettä. Edeskärin (2006) mukaan tulokset routimisen vähentämiseksi olivat lupaavia. Rengasrouhetta käytettäessä rakenteen routanousu kulutuskerroksen päällä aleni n. 23 % verrattuna kivennäismaa-ainesrakenteeseen. Maa-aines- ja rengasrouherakenteiden kerrospaksuudet olivat saman paksuiset (kuva 5).

Rengasrouheen rakennekerroksen paksuuksien ja rengasrouheen ominaisuuksien vaihtelut aiheuttivat ongelmia rakentamisen aikana (Edeskär 2006). Edeskärin (2006) mukaan mm. rengasrouheen kimmomoduuli vaihteli eri testausmenetelmien kesken, mikä edellyttää testausmenetelmien kehittämistä jatkossa. Tuolloin käytössä oli vielä liian vähän tietoa tämäntyypin rakenteen suunnitteluun.



**Kuva 5.** Bodenissa, Pohjois-Ruotsissa, rengasrouheella toteutettu routasuojaus-rakenne, jossa pohjamaa oli siltimoreenia, sen yläpuolella 600 mm paksu kerros 50\*50 mm<sup>2</sup>:n rengasrouhetta suojattuna suodatinkankaalla, alaosan rakenteena oli 500 mm:n paksuinen kerros kuonaa tai mursketta, kantava kerros oli 80 mm mursketta ja kulutuskerros oli 45 mm paksu maksimiraekooltaan 16 mm olevaa asfalttia. (Edeskär 2006)

Toinen koerakentamiskohde on toteutettu lähellä Richmondin kaupunkia Mainen osavaltioissa Pohjois-Yhdysvaltain itärannikolla. Alueella vallitsee samantyyppiset talviolosuhteet kuin Pohjois-Ruotsissa. Koekohteessa roudan syvyys voi edetä maksimissaan lähelle 1.5 metrin syvyyttä. Koetieosuuksilla käytettiin 150 mm:n (6") ja 300 mm:n (12") vahvuisia rengasrouhekerroksia, joiden yläpuolelle oli rakennettu kolme erivahvuista (300 mm, 450 mm ja 600 mm) kantavaa rakennekerrosta murskasta kiviaineksesta. Vertailurakenteena olivat vastaavan vahvuiset kivennäismaa-ainesrakenteet, joissa rengasrouhekerrokset oli korvattu kivennäismaa-aineksella. Koetieosuuden liikenne muodostui henkilöautoista ja raskaasta liikenteestä. Linja-autot ja 2- tai 3-akseliset kuorma-autot muodostivat pääosan raskaasta liikenteestä (Humphrey & Eaton 1995). Tutkimuksesta ei ilmennyt ajoneuvojen määrä tai sen jakauma eikä myöskään akselikuormitusten ylitysmäärä.

Kenttätutkimuksen tulokset osoittavat, että roudan syvyys aleni kahden tarkastelujakson aikana keskimäärin 22...28 % vertailurakenteeseen nähden (Humphrey & Eaton 1995). Vertailurakenteessa oli rengasrouheen sijasta käytetty kivennäismaa-ainesta. Humphrey & Eatonin (1995) tutkimuksen tulokset vastaavat Edeskärin (2006) tekemän tutkimuksen tuloksia. Vastaavasti routanousu rakenteen pinnassa,

300 mm:n vahvuudessa rengasrouherakenteessa, oli ensimmäisen tarkastelujakson aikana 10 mm ja toisen jakson aikana 40 mm. Vertailurakenteessa, jossa ei ollut käytetty rengasrouhetta, samojen tarkastelujaksojen aikana routanousut olivat 55 mm ja 90 mm. Tulokset osoittavat, että rengasrouheen avulla vaikutuksesta koetieosuuksilla pystyttiin vähentämään routanousun vaikutuksia (Humphrey & Eaton 1995).

### 2.3.3 Granulaatin hyödyntäminen asfaltin lisäaineena

Rengasgranulaattia on käytetty asfaltin lisäaineena korvamaan osa bitumista tai sen avulla on muutettu bitumin koostumusta. Granulaatin avulla pystytään lisäämään asfaltin pinnan kitkaa, mikä vähentää auton mahdollisuutta lähteä liirtoon kaarteissa (Shulman 2004). Shulmanin (2004) mukaan granulaatin käyttäminen asfaltissa vähentää tärinää ja melua kuten myös tiestä heijastuvaa valoa vähentäen häikäisyä. Granulaatti ehkäisee lisäksi vesisumun muodostumista renkaasta auton taakse.

Granulaattia on käytetty Australiassa, Yhdysvalloissa ja Kanadassa asfaltin lisäaineena korvaamaan bitumia. Käyttö on kuitenkin vähentynyt kustannuksista johtuen ja siitä on osittain luovuttu (Kumar 2007).

Granulaatista on valmistettu vahvisteverkkoja asfalttikerrosten väliin. Niitä on käytetty kulutuskerroksessa yhdessä granulaatista valmistetun kumiemulsion ja polymeerien kanssa vahvistamaan kahden asfalttikerroksen välistä tartuntaa ja estämään asfaltin halkeileminen. Tästä sovellutuskohdeesta on esimerkki kuvassa 6.



Kuva 6. Rengasgranulaatista valmistettua verkkoa, jota käytetään estämään halkeilua ja sitomaan kaksi asfalttikerrosta toisiinsa.

### 2.3.4 Rengasrouheen käyttäminen meluvallissa

Meluvallit ovat tyypillisiä ns. ylijäämämaiden sijoituspaikkoja. Rengasrouheella voidaan korvata maa-ainesta meluvallissa osittain tai kokonaan. Rengasrouheen käyttöä tukee sen keveys, koska maa-ainekseen verrattuna rakenteen kuormituksen vaikutus

alapuoliseen maaperään vähenee. Meluvallissa voidaan käyttää rengasrouheen sijasta myös kokonaisia autonrenkaita, jolloin renkaita ei tarvitse leikata rouheeksi.

Renkaat soveltuvat kokonaisena tai rouheena erittäin hyvin meluvallien materiaaliksi, koska niistä ei aiheudu ongelmaa ympäristölle (Edeskär 2006). Liikennevirasto on tehnyt vuonna 2011 kevennysrakenteiden mitoituksista suunnitteluohjeen (5/2011), jossa kuvataan yleisellä tasolla rengasrouheen hyödyntämismahdollisuuksia (Hairaka ym. 2011). Rengasrouheen ja rengasgranulaatin käyttäminen meluvalleissa ei edellytä nykyisen käytännön mukaan ympäristölupamenettelyä Suomessa (Hairaka ym. 2011).

## 2.4 Rengasrouheen ja -granulaatin hyödyntäminen ratarakenteissa

Kirjallisuudesta on löydettävissä toistaiseksi vain vähän tietoa ja kokemuksia kierrätysrengasmaterialien käyttämisessä ratarakenteissa. Tiedon vähäiseen määrään vaikuttaa se, ettei kierrätysrengasmaterialien käytöstä ole riittäviä geoteknisiä ohjeita ratarakenteiden suunnittelua varten. Rengasrouheen ja -granulaatin testaamisen ja tutkimuksen pääpaino on ollut raideliikenteen aiheuttaman tärinän vaimentamisessa.

Kirjallisuuden perusteella ei pystytä määrittämään yksiselitteisesti kaikkia niitä mitoitustekijöitä, jotka radan ja raideliikenteen vaikutuksesta tulee suunnitellussa huomioida. Voidaan kuitenkin todeta, että tärinän vaimennukseen liittyviä toteutusvaihtoehtoja voitaisiin todennäköisesti varsin pienillä modifioinneilla soveltaa suomalaisen ratarakentamiseen.

### 2.4.1 Raideliikenteen aiheuttaman tärinän vaimentaminen

Kierrätysrengasmaterialiaaleja on käytetty tutkimuskohteissa alentamaan raideliikenteen aiheuttamaa tärinää erilaisissa kohteissa. Tähän aiheeseen liittyviä tutkimuksia ovat tehneet mm. Yhdysvalloissa Humphrey & Wolfe (1999), Sveitsissä Zach (1999), Etelä-Koreassa Cho (2007) ja Englannissa Rossetti (2005), joiden tietoja voidaan osittain hyödyntää. Tutkimustulosten keskinäinen vertaaminen tai yhtäläisyyksien hakeminen on haastavaa, koska tarkastelussa käytetyt tutkimusmenetelmät, rakenteet ja niiden tekniset ominaisuudet sekä niiden tärinänmittaustekniikka poikkeavat toisistaan.

Cho:n (2007) ja Humphrey:n & Wolfe:n (1999) tekemät tutkimukset ovat konkreettisesti raideliikenteeseen sovellettavissa, minkä perusteella niitä tarkastellaan tarkemmin lähemmin tässä kirjallisuusselvityksessä. Rossetti (2005) on kehittänyt melun ja tärinän vähentämiseen teoreettisen tarkastelumallin, jonka soveltaminen sellaiseen ei ole mahdollista. Zachin (1999) tutkimuksen julkaistu kirjallinen tieto on liian rajallinen ja kuvaa ratarakenteen yläosan ”bitumistabilointia”, jonka soveltamisesta ei ole saatavissa mitään muuta kirjallista näyttöä.

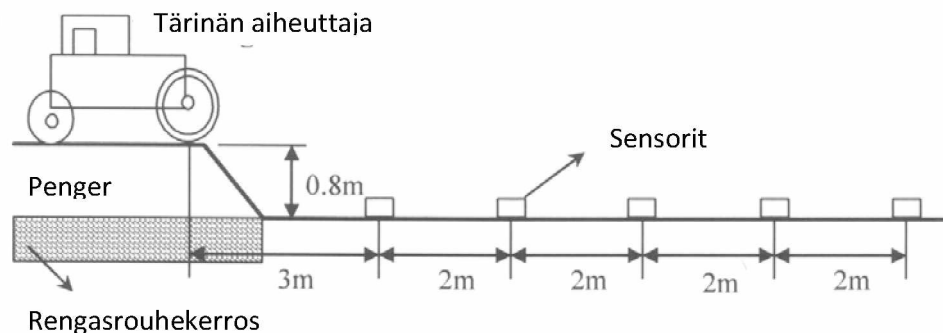
Chon (2007) ja Humphrey:n & Wolfen (1999) tekemissä tutkimuksissa rengasrouhetta käytettiin ja simuloitiin suoraan ratarakenteessa tukikerroksen alapuolella erivahvuksina kerroksina ja seurattiin tiettyjen aallonpituuksien etenemisnopeutta sekä vaimentumista desibeliasteikolla. Kuvassa 7 on periaatekuva Chon (2007) tekemästä koerakenteesta. Tukikerroksen alapuolella käytettiin kahta erivahvuista palakooltaan 50\*50 mm<sup>2</sup> olevaa rengasrouhekerrosta, joiden kerrospaksuudet olivat 200 mm ja



500 mm. Rakennetta kuormitettiin mittauskohdan ylittävällä junakuormalla, jota ei ollut tarkemmin tutkimusaineistossa määritelty.

Junien nopeudet koerakenteen kohdalla vaihtelivat välillä 107...120 km/h. Rengasrouheen yläpuolisen tukikerroksen paksuus oli 800 mm. Tutkimuksen tulokset osoittavat, että 22...33 Hz:n väliset värähtelytaajuuksien alenivat 200 mm:n rengasrouhekerroksella 16...30 % ja 500 mm:n rakennekerroksella 24...36 %. Tutkimuksesta ei käy ilmi tarkoitetaanko desibeliasteikolla vai absoluuttisella asteikolla tapahtunutta muutosta, eikä tämän perusteella pystytä ottamaan kantaa värähtelyn suuruuteen. Chon (2007) mukaan tämä tutkimustulos osoittaa värähtelyn heikentyneen, millä on todennäköisesti vaikutusta ratarakenteen lähiympäristöön.

Tutkimusaineistosta puuttui kuitenkin tämän kirjallisuusselvityksen kannalta olennaisia tietoja. Tärkeimpiä puuttuvia tietoja olivat rengasrouherakenteen kokoonpuristuma, huokoisuus, käytetty esitiivistysmäärä ja kalusto, rakenteen yläpinnan kimmoinen maksimi siirtymä ja junakuorman aiheuttamat kuormitukset rakenteeseen (Edeskär 2006). Nämä tekijät ovat keskeisessä roolissa rakenteen toimintaa tarkasteltaessa. Tutkimusraportti kuvaa, että rakennetta kuormitettiin todellisella juna-kuormalla, jolloin kokoonpuristuma ja kimmomoduuli täytyy tuntee. Tämän kirjallisuusselvityksen muiden lähdeviitteiden perusteella ei ole mahdollista rakentaa rengasrouheesta Edeskärin kuvaamaa paksua rakennetta ilman lisäaineita tai rakenteen lisäkuormitusta. Junan kuormituksen vaikutuksesta johtuen rengasrouheen kimmoinen maksimi siirtymä ylittää sallitun 5 mm (Törnqvist 2012).



Kuva 7. Periaatekuva Etelä-Koreassa toteutetusta koerakenteesta, jossa 50\*50 mm<sup>2</sup> raekooltaan olevaa rengasrouhetta käytettiin vähentämään raideliikenteen aiheuttamaa tärinää 200 ja 500 mm:n paksuisina rakennekerroksina.

Humphreyn & Wolfen (1991) koerakenteessa, joka toteutettiin Chicago Gradenin kaatopaikalla Templetonissa Californiassa, oli käytetty kolmea eri rengasrouhepaksuutta, 150 mm (6"), 200 mm (8.5") ja 250 mm (10"), sekä vastaavan paksuisesta kivennäismaa-aineksesta tehtyä vertailurakennetta. Rakenteen yläpuolelle oli levitetty murskekerros, jonka paksuus perustui Yhdysvaltain tierakenteissa käytettäviin normeihin. Tietoa kerrospaksuuden vahvuudesta ei ole käytettävissä, mutta se oli vahvuudeltaan sama jokaisessa rengasrouhe- ja kivennäismaa-ainesrakenteessa. Rengasrouhe levitettiin kauhakuormaajalla ja tiivistettiin täräjätyrillä. Rengasrouhekerrokseen aiheutettiin kuormitus kauhakuormaajalla, täräjätyrillä ja kuorma-autolla, jonka lavalla oli täynnä oleva vesisäiliö lisäämässä painoa.

Simuloinnin tulokset vastaavat Chon (2007) tekemien tutkimustuloksien kanssa. Tulosten perusteella rengasrouheella pystyttiin vähentämään tärinän vaikutusta rata-rakenteen välittömässä läheisyydessä. Tästäkin artikkelista puuttuivat tämän kirjallisuusselvityksen kannalta olennaiset tiedot rengasrouherakenteen kokoonpuristumasta, huokoisuudesta ja rakenteen yläpinnan kimmoisesta maksimisiirtymästä. Rakenteen tekeminen näin vahvoilla rakennekerroksilla ei todennäköisesti ole mahdollista 5 mm:n kimmoisen maksimisiirtymän rajoissa ilman rengasrouheen lisäaineita.

## 2.5 Lisäaineiden vaikutus rengaskierrätysmateriaalien ominaisuuksiin

Tyypillisiä lisäaineita, joilla vaikutetaan rengasrouheen ja –granulaatin ominaisuuksiin tai pyritään lisäämään materiaalien käytettävyyttä, ovat eri rengasfraktioiden sekoittaminen toisiinsa, kiviaineksen lisääminen tai sementin lisääminen rengasmateriaalin joukkoon. Kaikkien näiden lisäaineiden käyttäminen rengasrouhemateriaalien kanssa edellyttää ennakkokokeiden tekemistä, koska niiden vaikutuksista on kirjallisuudessa erittäin vähän tietoa ja vallitsevat olosuhteet vaikuttavat rakenteen toimivuuteen olennaisesti.

Granulointiprosessin aikana on mahdollista sekoittaa muita hienojakoisia aineita, kuten pienen raekoon ( $< 5$  mm) kivennäismaa-ainesta, granulaatin sekaan. Kirjallisuudesta ei löytynyt tietoa siitä, miten suuria määriä rengasrouhetta ja kiviainesta voidaan tehokkaasti ja homogeenisesti sekoittaa. Niinpä ei pystytä ottamaan kantaa eri sekoitusprosessien välisiin eroihin, jotka vaikuttavat lopputuotteen homogeenisuuteen. Vulkanisointiprosessin aikana pystytään granulaattiseokseen lisäämään aineita, joilla sen ominaisuuksia voidaan muuttaa. Huokoisuutta lisätään puhaltamalla ilmaa tai ruiskuttamalla vettä granulaattiseokseen. Materiaalikustannukset kasvavat olennaisesti lisäaineiden lisäämisestä, ja käsittelyprosessin hyödyt täytyy tunnistaa etukäteen (Danch ym. 2004).

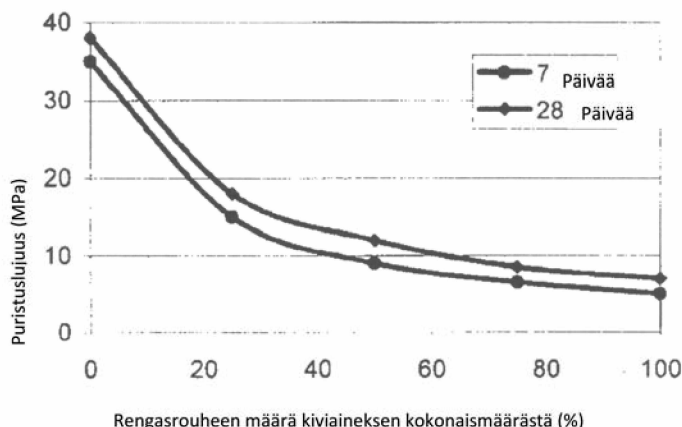
### 2.5.1 Kiviaineksen vaikutus rengaskierrätysmateriaalien ominaisuuksiin

Kiviaineksen avulla granulaatti saavuttaa pienemmän kokoonpuristuvuuden, jolloin sitä voidaan hyödyntää erityyppisiin sovellutuskohteisiin. Kiviainesta ja granulaattia pystytään sekoittamaan rumpu- tai jyrsintyyppisellä sekoittimella kentällä ja siirtämään valmis seos levityskohteeseen. Menetelmästä on aikaisempaa kokemusperäistä tietoa Kuusakoski Oy:n toteuttamista työkohteista. Tämä vaihtoehto on kustannuksiltaan edullinen verrattuna ns. asemasekoitukseen granulointiprosessin aikana.

### 2.5.2 Sementin vaikutus rengaskierrätysmateriaalien ominaisuuksiin

Sementin avulla pystytään pienentämään kierrätysrengasmateriaalien kokoonpuristuvuutta (Nehdi & Khan 2001; Sgobba ym. 2010) (kuva 8). Lähtötilanteessa pelkän kiviaines-sementtiseoksen puristuslujuus on n. 40 MPa. Rengasrouheen lisääminen suhteessa seoksen määrään alentaa seoksen puristuslujuutta kuvan 8 mukaisesti. Kuvassa 8 on määritetty puristuslujuuden muutos 7:n ja 28 vuorokauden kuluttua rengasrouheen sekoittamisesta kiviaines-sementtiseokseen. Ajalla ei ole oleellista vaikutusta seoksen puristuslujuuden muutokseen (Nehdi & Khan 2001).

Sementin käyttämisen ongelmaksi muodostuu materiaalien suurien määrien sekoittaminen ja sekoittamisen jälkeen käsiteltävyys (Nehdi & Khan 2001). Tämä johtuu sementin vaikutuksesta, koska rengasrouhe-, vesi- ja sementtiseos alkaa jäykistyä materiaalien sekoituksen jälkeen. Jäykistymisen jälkeen materiaalin kuljettaminen ja levittäminen vaikeutuvat eikä voida enää jalostaa halutulla tavalla (Nehdi & Khan 2001).



Kuva 8. Rengasrouheen lisäämisen vaikutus kiviaines-sementtiseoksen puristuslujuuteen 7:n ja 28:n vrk ajan funktiona (Nehdi & Khan 2001).

## 2.6 Muita käyttömahdollisuuksia

### 2.6.1 Veden johtaminen kuivatusrakenteena

Rengasrouheen ja -granulaatin hydraulinen johtavuus on suurempi kuin kivennäis-maa-aineksella. Tästä syystä kierrätysrengasmateriaalit soveltuvat erinomaisesti käytettäväksi tie- ja rata-alueiden kuivatus- tai pystysalaojarakenteina.

Suuren huokoisuuden vuoksi kierrätysrengasmateriaalien tukkeutuminen veden mukana tulevan hienoaineksen vaikutuksesta on pienempi kuin kiviaineksella. Hydraulisia ominaisuuksia on käsitelty laajemmin tämän kirjallisuusselvityksen luvussa 3.3.

### 2.6.2 Värjätyn granulaatin hyödyntäminen

Värjättyä granulaattia ja koriste-elementtirakenteita on käytetty erilaisissa maisemakoristeissa ja kaupunki-infrastruktuurissa. Esimerkkejä toteutetuista kohteista on kuvissa 9 ja 10. Kohteet osoittavat, että vain mielikuvitus on rajana erilaisten materiaalikombinaatioiden ja värijakaumien käyttämisessä rakennetun ympäristön elävöittä-miseksi.



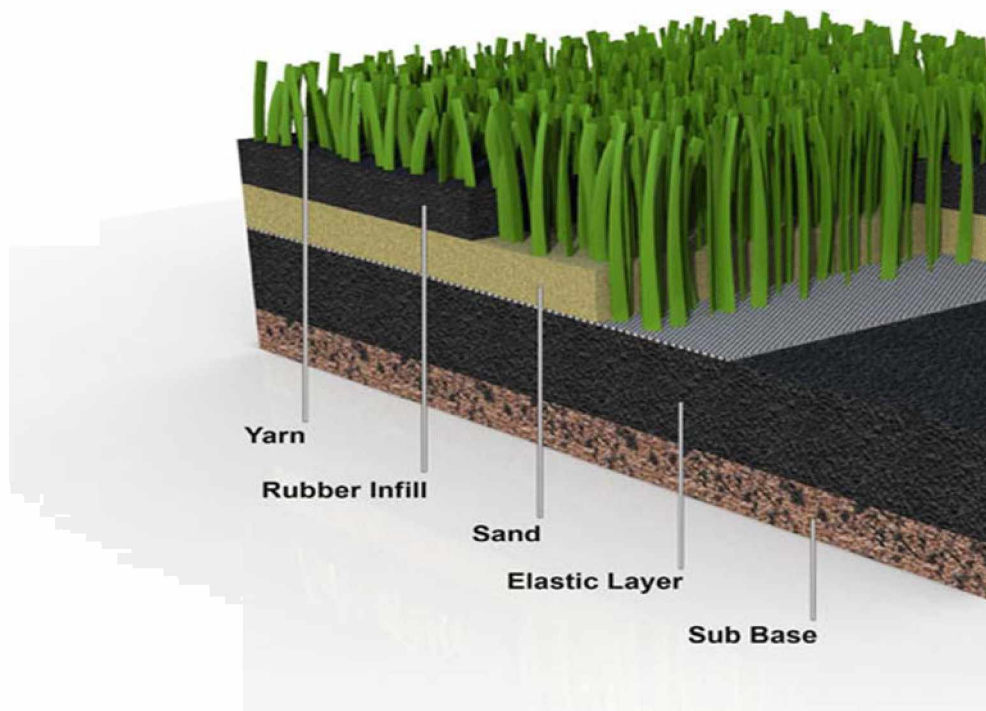
Kuva 9. Rengasgranulaatista valmistettuja erivärisiä variaatioita.



Kuva 10. Rengasgranulaattia rakennusten keskellä värittämässä kaupunkikuvaa.

### 2.6.3 Rengasrouhe ja -granulaatti rakennekerrosten alustana

Rengasrouhetta ja -granulaattia voidaan käyttää erilaisten kasvualustojen tukena ja suojana. Granulaattia käytetään kasvualustana tekonurmikentissä ja samalla estämään muun kasvuston pääseminen nurmetuksen läpi (kuva 11). Muita käyttökohteita ovat eroosiosuojaukset, joissa rengasgranulaatista valmistetut verkot sitovat maainesta.



Kuva 11. Keinotekonurmilaatta, jossa alustana on käytetty joustavaa granulaattikerrosta (Elastic layer) ja keinonurmimaton päällä on granulaattikerros tukemassa ja suojaamassa nurmea (rubber infill).

#### 2.6.4 Ratapölkkyt kierrätysmateriaalista

Ratapölkkyjä on valmistettu kierrätysmateriaaleista, lähinnä muovista ja eri polymeerien yhdistelmistä (kuva 12 a). Polymeeripölkkyissä käytetään rengasgranulaattia raaka-aineena. Ratapölkkyt vahvistetaan terästangoilla, jolloin niiden jäykkyyttä saadaan lisättyä vastaamaan raideliikenteen tarpeita. Kierrätysmateriaalista valmistettujen ratapölkkyjen etuja perinteisiin betoni- tai puupölkkyihin verrattuna ovat keveys ja raideliikenteen aiheuttaman värinän vaimentaminen. Kirjallisuustiedon perusteella polymeeripölkkyt eivät vaurioidu betonipölkyn tapaan. Lisäksi ne voidaan 100 %:sesti kierrättää elinkaaren lopussa. Saksassa polymeeripölkkyjä on käytetty mm. tunneleissa ja silloissa alhaisen painon vuoksi. Polymeeripölkkyjä on käytetty kuormituksen aiheuttaman värinän vähentämiseen positiivisin kokemuksiin (Scheibe 2008).

Scheiben (2008) mukaan polymeeripölkkyä on Saksassa käytetty rataosilla, joiden maksimiliikennöintinopeus on 160 km/h ja niitä on testattu Saksassa myös kaivoksissa, joissa pakkasta voi olla enimmillään -25 °C (Lankhorst-Mouldings 2008). Hollannissa polymeeripölkkyjä on käytetty vuodesta 2006 alkaen ja niitä on testattu 30 t:n akselipainoilla rataosilla, joilla kuljetetaan raskaita hiilivaunuja (Lankhorst-Mouldings 2008) (kuva 12 b).

Hollannissa on testattu polymeeripölkkyjä joiden paino on vain 70 kg/kpl ja niistä on saatu positiivisia kokemuksia. Polymeeripölkkyjen tiheys on samaa luokkaa kuin rengasrouheen ja -granulaatin, 1,02 t/m<sup>3</sup>. Polymeeripölkky ei lämpöaajene, ei absorboi vettä itseensä ja sitä voidaan käyttää -50...+70 °C:n lämpötila-alueella (Lankhorst-Mouldings 2008).





*Kuva 12 a ja b. Kuvassa 12 a on polymeeripölkkyjä käytetty ratarakenteessa. Kuvassa 12 b on raskashiilijuna ylittämässä polymeeripölkkyistä valmistettua rataa. (Lankhorst-Mouldings 2008).*

Polymeeripölkyn käyttöikäksi on mitoitettu vähintään 30 vuotta, mikä ei vielä ole voitu käytännössä osoittaa, koska ensimmäiset polymeeripölkkyt on asennettu alle 10 vuotta sitten. Pitkää käyttöikää tukee polymeeripölkkyateriaalin vesitiiviys, joka estää pölkkyä vääntymästä, hajoamasta ja paisumasta veden vaikutuksesta. Saksassa tehtyjen vertailujen pohjalta elinkaaritarkastelussa polymeeripölkyn kokonaiskustannukset verrattuna betoni- tai puupölkkyyn ovat kilpailukykyiset polymeeripölkyn huoltovapauden ja teknisten ominaisuuksien säilyvyyden ansiosta (Scheibe 2008).

## 3 Rengasrouheen ja -granulaatin materiaaliominaisuudet

### 3.1 Yleistä

Tässä osiossa käsitellään rengasrouheen ja -granulaatin yleisiä ja teknisiä ominaisuuksia sekä niiden vaikutusta materiaalin käyttäytymiseen eri tilanteissa ja olosuhteissa. Renkaat sisältävät luonnonkumia ja synteettistä kumia, jotka ovat öljyn ja kaasun yhdisteitä. Lisäksi tuotantoprosessissa on käytetty polymeerejä, metallia ja lisäaineita parantamaan renkaan suorituskykyä. Rengasgranulaatin kumipitoisuus on 95...98 %:n eikä sisällä renkaanvahvikkeena käytettyä metallia.

Rengasrouheen ja -granulaatin materiaaliominaisuuksia on tutkittu laboratoriossa ja koerakenteissa erilaisissa olosuhteissa eri puolilla maailmaa. Materiaaliominaisuuksia tarkasteltaessa tulee huomioida tutkimuksissa ja kenttäkokeissa vallinneet olosuhteet, joilla on merkittävä vaikutus rengasrouheen ja -granulaatin rakenteelliseen toimintaan.

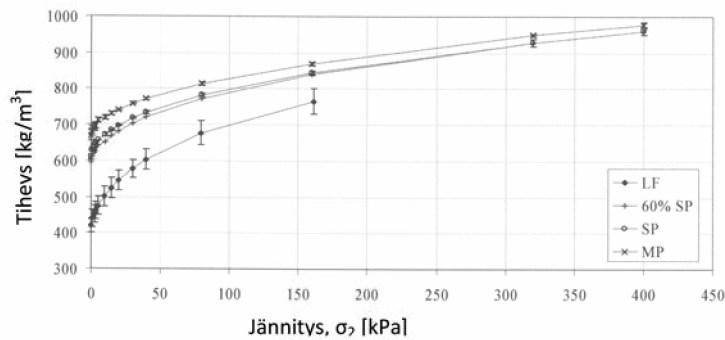
### 3.2 Luokitusominaisuudet

#### 3.2.1 Tiheys ja tiheyden määrittäminen

Ominaispaino,  $\rho_s$ , on kiinteän rengasrouhepalan paino tilavuusyksikköä kohden normaaliolosuhteissa. Rengasrouheen ominaispaino vaihtelee välillä 1.02...1.27 t/m<sup>3</sup> sen mukaan, kuinka paljon rengaspala sisältää metallia (Ahmed 1993; Humphrey & Manion 1992; Humphrey ym. 1992). Rengasrouheen ominaispaino on hieman suurempi veden ominaispainoon verrattuna, joten rengasrouhemateriaali ei nouse vesipinnan alapuolella. Kuitenkin rengasrouhe on huomattavasti kevyempää kuin maa- ja kiwiainesfraktiot.

Rengasgranulaatin ominaispaino vaihteli kirjallisuuden perusteella välillä 1.12...1.16 t/m<sup>3</sup> (Kieft 2008; Yang ym. 2002). Granulaatti oli rakeisuudeltaan 0.5...2.0 mm.

Tiheyden käyttäytymistä on tutkittu löyhällä rengasrouheella sekä rengasrouheella, joka on tiivistetty standardi Proctor -tiiviyteen ja 60 % -tiiviysasteen standardi Proctorin tuloksesta ja parannettuun Proctor -tiiviyteen tiivistetyillä rengasrouheilla. Kokeessa olleen rengasrouheen palakoko oli 300\*300 mm<sup>2</sup> ja 50\*75 mm<sup>2</sup>. Kuvassa 13 on esitetty tiheyden muutos pystysuuntaisen jännityksen suhteen. On huomioitavaa, että pienillä kuormituksilla tiheys kasvaa nopeasti kaikilla tiivistysasteilla samanlaisella trendillä n. 160 kPa tasolle, jonka jälkeen tiheys lähestyy tasoa 980...990 kg/m<sup>3</sup> lähestyttäessä 400 kPa:n jännitystilaa. Moo-Youngin(2003) mukaan 50...75 mm<sup>2</sup> rae-kooltaan olevan rengasrouheen tiheys on n. 10 kg/m<sup>3</sup> suurempi verrattuna suurempiin palakokoihin, 100...300 mm<sup>2</sup>.



Kuva 13. Pystyjännityksen vaikutus tiheyteen eri tiivistysasteeseen tiivistetyillä rengasrouheilla. Löyhästi tiivistetty (LF), Standard Proctor -tiivistys (SP) ja parannettu Proctor -tiivistys (MP) 50 \*50 mm:n rengasrouheella. (Edeskär 2006).

### 3.2.2 Tilavuuspaino

#### 3.2.2.1 Rengasrouhe

Tilavuuspaino ilmoittaa tutkittavan aineen painon suhteen sen tilavuuteen. Tilavuuspainoon vaikuttavat materiaalin ominaispaino, partikkelien raekoko/palakoko, tiiviys ja kuormitus. Rengasrouheen tilavuuspainoa voidaan kasvattaa tiivistämällä rengasrouhetta mekaanisesti. Humphreyn ja Manion (1992) tutkimukset osoittavat, että mekaanisella tiivistämisellä saadaan aikaan vain vähäistä tilavuuspainon lisääntymistä, koska maksimikuivatilavuuspaino saavutetaan varsin vähäisellä tiivistämistyöllä. Lisäksi vesipitoisuuden vaihtelulla on osoitettu olevan vain vähäinen merkitys rengasrouheen tiivistymisessä (Humphrey & Manion 1992).

Humphreyn (1997) mukaan tiivistämättömän rengasrouheen tilavuuspaino vaihtelee välillä 2.3...4.8 kN/m³ ja kuormitetun rengasrouheen välillä 9.5...9.7 kN/m³ 400 kPa jännitystilassa (Humphrey ym.) 1992; Weterberg & Macsik 2001; Edeskär 2006). Tilavuuspainoon vaikuttavat rengastyypin väliset erot sekä se, onko niissä käytetty teräs- vai lasikuituvahvisteista rakennetta tai näiden sekoitusta. Teräsvahvisteiset renkaat ovat tilavuuspainoltaan suurempia verrattuna lasikuituvahvisteisiin tai yhdistelmävahvisteisiin renkaisiin. Suomessa ei ole käytetty lasikuituvahvisteisiä renkaita, mutta käytettyjä renkaita voidaan tuoda maahan ulkomailta, missä lasikuituvahvisteita on käytetty. Luonnon materiaalien märkätilavuuspaino vaihtelee saven 14 kN/m³:n ja soran 22 kN/m³:n välillä, ja se on merkittävästi suurempi rengasrouheen tilavuuspainoon verrattuna (Mitchell 1993; Terzaghi & Peck 1967). Rengasrouheen tilavuuspainon määrittämiseen on käytetty ASTM D 4253 -standardin mukaisesti "Standard Test Method for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table" (ASTM, 2008) Humphreyn (1997).

#### 3.2.2.2 Rengasgranulaatti

Sobralin (2003) mukaan 0.166 MPa:n kuormituksella rakeisuudeltaan 0.5...1.5 mm olevan rengasgranulaatin tilavuuspaino on n. 7 kN/m³ ja 0.125 MPa kuormituksella rakeisuudeltaan 2.0...3.0 mm olevan materiaalin n. 6.3 kN/m³. Rengasgranulaatin tilavuuspaino alenee rakeisuuden kasvaessa, mikä johtuu suurempirakeisen materiaalin huokoisuuden kasvusta. Kieftin (2008) mukaan rengasgranulaatin kuormittamaton tilavuuspaino oli 4.78 kN/m³ 2.0...3.0 mm:n fraktiokoolla (Kieft 2008).



### 3.2.3 Rakeisuus

Rengasrouhe pystytään valmistamaan rakeisuusvälille 50...300 mm<sup>2</sup> käyttökohteen mitoitustarpeen mukaisesti. Rengasrouheen rakeisuudella tarkoitetaan maksimiraekokoa, jonka jakaumaa ei ole rajattu tai sille ei määritetty raekoon jakauman suhteen vaihteluväliä (Humphrey 1997). Rakeisuus on materiaalin nimelliskoko ja yksittäisten partikkelien koko ja muoto voivat vaihdella nimellisarvosta. Lisäksi raekokojakauma voi vaihdella riippuen materiaalityypistä ja käytetystä laitteistosta, jolla rengasrouhe on valmistettu. Tämä johtuu renkaan leikkausprosessista, koska kokonainen rengas voi olla eri asennoissa leikkaushetkellä. Nämä tekijät vaikuttavat rengasrouheen muotoon ja sen vaihteluun. Rakeisuus vaikuttaa rengasrouheen tiivistyvyyteen, koska mitä pienempi on raekoko, sitä huokoisempi on rakenne ja sitä helpompi tiivistää.

Rengasgranulaatti voidaan seuloa Suomessa 2...25 mm:n raekoon välille käyttökohteen vaatimaan fraktioon. Granulaatista poistetaan jalostusprosessin aikana teräs- tai lasikuituvahvisteet, jolloin se ei vahingoita muita materiaaleja, joihin granulaatti on kosketuksissa. Rengasrouheen ja granulaatin rakeisuus voidaan määrittää ASTM C 136 -standardin mukaisesti, "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates" (ASTM, 2008).

### 3.2.4 Huokoisuus

Huokoisuus ilmoittaa ei-kiinteän aineen suhteen aineen kokonaistilavuuteen. Huokosten määrä ilmoitetaan huokosluvun  $e$  tai huokoisuuden  $n$  [%] avulla. Huokoisuus vaihtelee rengasrouheessa materiaalin palakoon/rakeisuuden ja tiiviyssuhteen suhteessa. Löyhässä ja ison palakoonrengasrouheessa on selvästi suurempi määrä huokosia verrattuna hyvin tiivistettyyn ja pienen palakoon rengasrouheeseen (Humphrey ym. 1993).

Rengasrouheen vedenläpäisevyys riippuu suoraan rengasrouheen huokoisuudesta ja raekoosta. Suuremman huokoisuuden ja rakeisuuden omaavalla rengasrouheella on suurempi vedenläpäisevyys pienempään raekokoon tai huokoisuuteen verrattuna. Tämä oletus voidaan yleistää karkearakeisiin materiaaleihin. Kuitenkin hienorakeisilla materiaaleilla kuten savella on suuri huokoisuus, mutta pieni vedenläpäisevyys. Huokosluku voidaan määrittää kaavan (1) avulla:

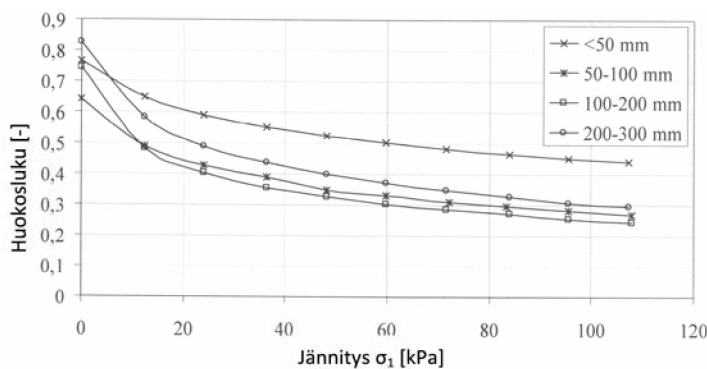
$$e = \frac{\rho_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1 \quad (1)$$

missä  $e$  on huokosluku,  $\rho_s$  on rengasrouheen ominaispaino,  $\gamma_w$  on veden tilavuuspaino ja  $\gamma_d$  rengasrouheen kuivatilavuuspaino. Tiivistämättömän rengasrouheen huokosluku vaihtelee tyypillisesti 1.5...2.5:n ja tiivistetyn rengasrouheen 0.9...1.2:n välillä. Huokoisuus ( $n=e/(1+e)$ ) vaihtelee tiivistämättömällä rengasrouheella välillä 60...70 % ja tiivistetyllä rengasrouheella välillä 45...55 %.

Dain (2008) tutkimuksessa granulaatti on pakattu ja tiivistetty ns. maksimitiiviyteen. Hänen mukaansa granulaatin huokoisuus vaihtelee raekoon mukaan lineaarisesti siten, että 10 mm:n granulaatin huokoisuus on 60 %, 15 mm:n 50 %, 18 mm:n 40 % ja 22 mm:n 20 %. Dain (2008) mukaan raekoon kasvaessa välillä 25...35 mm ei huokoisuudessa tapahdu muutosta, minkä perusteella voidaan olettaa sen säilyvän suurimmilla granulaattifraktioilla vakiona (Dai ym. 2008). Leikkausprosessi ja laitteisto eri

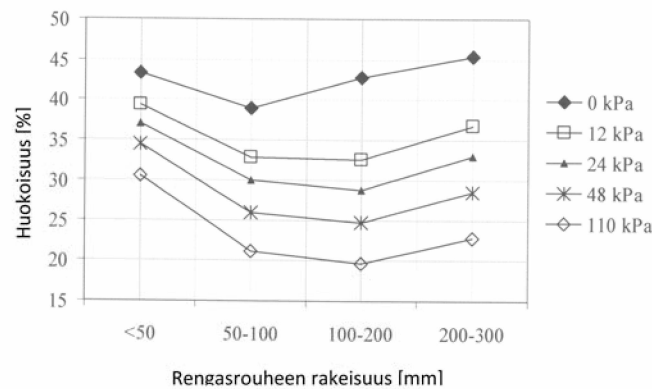
valmistajien kesken voi olla erilainen, jolloin raekoon vaihtelu on myös valmistajasta riippuvainen. Leikkaustavasta ja välppäyksestä ei ole yhtenäisiä menettelytapoja, vaan prosessi on laitteistosta ja laitteiston kunnosta riippuvainen tekijä. Tämä tarkoittaa, että kirjallisuustutkimuksen tuloksiin eri lähteistä tulee suhtautua varauksin ja Dain (2008) esittämät tulokset osoittavat vain kyseisen materiaalien materiaaliominaisuuksia.

Moo-Young (2003) on määrittänyt huokoisuuden muutoksen jännitystilan kasvun suhteen raekooltaan erilaisille rengasrouhemateriaaleille (kuva 14 ja 15). Kuvassa 14 on esitetty huokoisuuden muutos pystyjännitystilan kasvun suhteen Parannettuun Proctor -tiiviyyteen tiivistetyille 50...300 mm<sup>2</sup>:n rengasrouhefraktiolle. 80 kPa:n kuorituksen jälkeen huokoisuuden aleneminen hidastuu. Tässä tutkimuksessa ei ole tarkasteltu Dain (2008) tekemien alle 25 mm<sup>2</sup> fraktioiden huokoisuuden muutosta. Raekokofraktiot poikkeavat toisistaan ja tällä perusteella Dain (2008) tutkimuksen tulokset eivät ole vertailukelpoisia Moo-Youngin (2003) tekemien tulosten kanssa.



Kuva 14. Jännityksen vaikutus huokoslukuun 50...300 mm<sup>2</sup>:n rengasrouhefraktiolla. (Moo-Young ym. 2003).

Moo-Youngin (2003) mukaan huokoisuus alenee 100...200 mm<sup>2</sup>:n ja 200...300 mm<sup>2</sup>:n fraktioilla eniten jännitystilan kasvaessa 0:sta 110 kPa:iin (kuva 15). Alle 50 mm:n fraktiolla huokoisuuden alenema on huomattavasti pienempi suurempiin fraktioihin verrattuna. Tämä tieto tukee Dain (2008) tutkimuksen tulosta, että välillä 25...35 mm<sup>2</sup> fraktioiden huokoisuuden muutos on vakio.



Kuva 15. Rengasrouhefraktioiden vaikutus huokoisuuteen eri jännitystiloilla. (Moo-Young ym. 2003).

### 3.3 Hydrauliset ominaisuudet

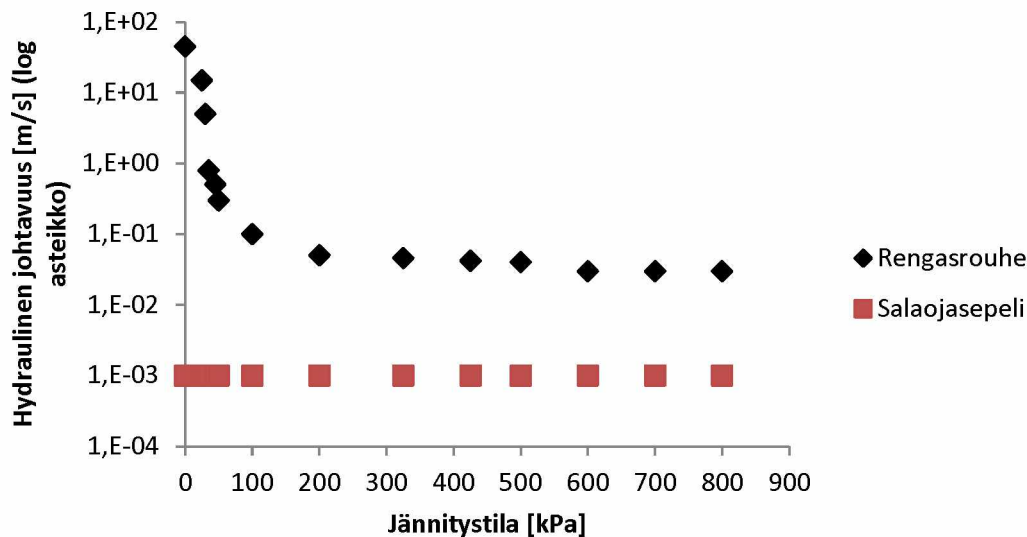
Hydraulinen johtavuus on yhteydessä vedenpidätyskykyyn testattavan nesteen ja rengasrouheen ominaisuuksien kautta. Relevantteja tekijöitä, jotka ovat suhteessa keskenään ja vaikuttavat hydrauliseen johtavuuteen, ovat nesteen tiheys [ $\rho$ ] ja viskositeetti [ $\mu$ ]. Vastaavasti rengasrouheen ominaisuuksista vaikuttavia tekijöitä ovat rakeisuus, partikkelien muoto, materiaalille ominainen turtoosinen tekijä, ominaispinta-ala ja huokoisuus (Othman & Seymour 2008; Bear & Palmer 1972). Hydraulisen johtavuuden ja vedenpidätyskyvyn välinen yhteys voidaan ilmaista kaavan 2 mukaan (Nutting 1930):

$$k = \frac{Kg\rho}{\mu} \quad (2)$$

missä  $k$  on hydraulinen johtavuus,  $K$  on materiaalille ominainen vedenpidätyskyky,  $g$  on maan vetovoiman kiihtyvyys,  $\rho$  on nesteen tiheys ja  $\mu$  on nesteen viskositeetti.

Kyllästysasteella ja huokoisuudella tai huokosluvulla on yhteys maa-aineksen osittain kyllästyneen tilan hydrauliseen johtavuuteen riippuen kyllästysasteesta (Mitchell 1993). Osittain kyllästyneen tilan hydraulinen johtavuus on pienempi verrattuna täysin kyllästyneen tilan hydrauliseen johtavuuteen (Mitchell 1993). Tämä johtuu siitä, että huokostilan tulee ensin saavuttaa täysin kyllästynyt tila, ennen kuin laminaarinen virtaus rakenteen läpi on mahdollinen. Kuitenkin materiaalin epähomogeenisuudesta johtuen laminaarinen virtaus on mahdollinen paikallisesti, vaikka rakenne ei ole kaikilta osin täysin kyllästyneessä tilassa.

Kirjallisuuden perusteella rengasrouheelle ja -granulaatille on tehty erittäin paljon hydraulisen johtavuuden testauksia laboratoriossa ja kenttäkokeissa (mm. Humphrey ym. 1992; Bresette 1994). Hydraulisen johtavuuden vaihtelu eri tutkimuksien kesken johtuu materiaaliominaisuuksien, testausominaisuuksien ja -olosuhteiden välisistä eroista. Kuvassa 16 on esitetty täysin kyllästyneen tilan aiheuttama Darcyn lain mukainen hydraulisen johtavuuden suhde rengasrouheen ja salaojasepelin jännitystilaan laminaarisessa virtauksessa.



Kuva 16. Yksi dimensionaalisen kuormituksen aiheuttaman jännitystilan vaikutus rengasrouheen ja salaojasepelin hydrauliseen johtavuuteen (Humphrey ym. 1993).

Rengasrouheen läpäisevään vesimäärään vaikuttavat keskeisesti mm. rengasrouheen palakoko/raekoko, rakenteen tiiviysaste, hydraulinen gradientti ja kuormituksen aiheuttama jännitystila. Kirjallisuuden perusteella näistä tekijöistä johtuen hydraulinen johtavuus vaihtelee välillä 0.6...24 m/s. Arvot ovat huomattavasti suuremmat verrattuna maa- tai kiviaineksen hydrauliseen johtavuuteen (Othman & Seymour 2008; Humphrey 1996; Donovan ym. 1996). Humphreyn (1992) ja Reddy & Saichek (1998) mukaan 400 kPa:n jännitystilassa rengasrouheen hydraulinen johtavuus on suurempi kuin 10–2 m/s.

## 3.4 Lujuus ja kokoonpuristuvuusominaisuudet

### 3.4.1 Leikkauslujuus

Rengasrouheen leikkauslujuus murtotilassa voidaan mallintaa Mohr-Coulombin yhtälöstä normaalijännityksen, kitkakulman ja koheesion avulla kaavasta (3):

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (3)$$

jossa  $\tau_f$  on leikkausvoima murtotilassa,  $c$  on koheesio,  $\sigma$  on normaalijännitys murtotilassa ja  $\phi$  on kitkakulma. Rengasrouheen leikkauslujuutta on testattu laboratoriossa rasialeikkauskokeella ja kirjallisuustietojen perusteella leikkauslujuusparametrien arvot ovat vaihdelleet kitkakulman osalta  $\phi$  20...40 asteen ja koheesion osalta välillä  $c = 8...10$  kN/m<sup>2</sup>. Laboratoriokokeissa määritettyihin tuloksiin vaikuttivat mm. rengasrouheen palakoko/raekoko, tiiviysaste ja kyllästysaste. (Duffy 1995; Cosgrove 1995; Humphrey ym. 1992)

Lujuusparametrit ovat samaa tasoa Suomessa maarakentamisessa käytettävien luonnonmateriaalien, kuten hiekan ja soran, joiden lujuusparametreja on esitetty taulukossa 1. Rengasrouheen lujuusparametrit eivät yleensä vaikeuta luiskien kantavuus- tai stabiiliteettilaskentaa, mikäli rakenne voidaan luiskata 1:3 kaltevuuteen, jolloin vakavuus on riittävä. Leikkauslujuus voidaan määrittää ASTM D 3080 -standardin mukaisesti, "Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions" (ASTM, 2008).

*Taulukko 1. Rengasrouheen, saven, hiekan ja soran leikkauslujuusparametrit.*

Materiaali	Rengasrouhe	Savi	Hiekka	Sora
Koheesio [kN/m <sup>2</sup> ]	8...10	2...20*	-	-
Kitkakulma [°]	20...40	15...25	30...38	34...40

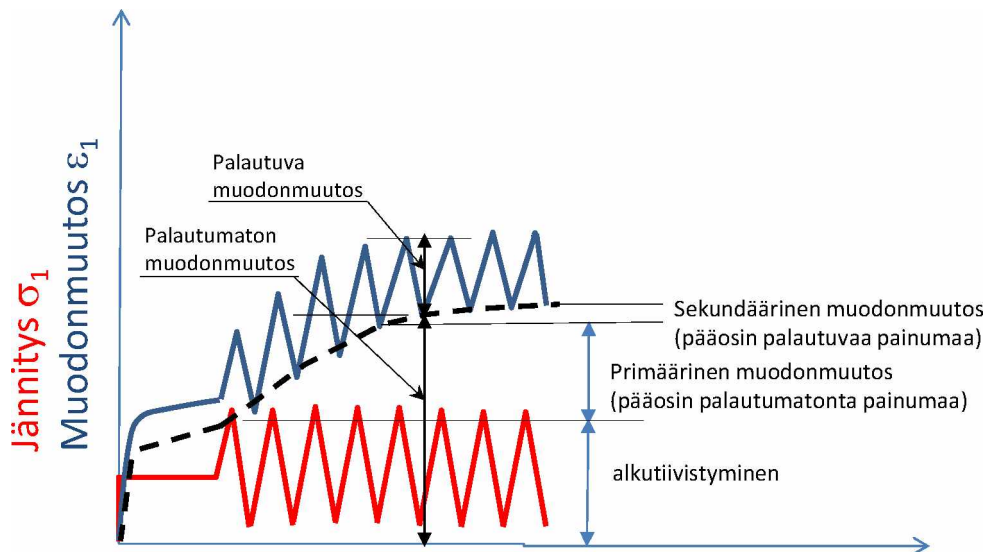
Huom. \* Saven leikkauslujuusparametreina on käytetty tehokkaita leikkauslujuusarvoja. (Humphrey 1993; Terzaghi & Peck 1967)

### 3.4.2 Kokoonpuristuvuus

Rengasrouheella ja -granulaatilla on merkittävästi suurempi kyky ottaa vastaan kuormituksen aiheuttamia muodonmuutoksia, mikä johtuu materiaalin huokoisuudesta ja muodonmuutosominaisuuksista verrattuna maa- ja kiviainesmateriaaleihin. Muodonmuutokset ovat hyvin pitkälti kuormituksen jälkeen palautuvia. Rouhe ja granulaatti kokoonpuristuvat suorassa suhteessa kuormituksen aiheuttamaan jännitystilaan. Kokoonpuristuman aiheuttaa palojen puristuminen tiiviimmin toisiinsa nähden, jolloin huokostilavuus pienenee.

Kuormituksen poistamisen jälkeen rengasrouhe- ja granulaattirakenne palautuvat takaisin lähes samaan huokostilaan kuin ennen kuormitusta (kuva 17). Tätä muodonmuutosta kutsutaan sekundääriseksi muodonmuutokseksi (Humphrey ym. 1993). Rengasrouheen ja rengasgranulaatin kokoonpuristuminen on maa-ainesmateriaaleihin nähden huomattavasti suurempaa, 5...50 % rakenteen kerrospaksuudesta. Muodonmuutoksen suuruus ja sen vaikutukset rakenteen toimivuuteen täytyy huomioida rakenteen mitoituksen yhteydessä. Kokoonpuristuvuuteen vaikuttavat rakenteen tiivistys ja esikuormitus, rakeisuus ja vesipitoisuus.

Molemmille materiaaleille on tyypillistä ensin tapahtuva primäärinen kokoonpuristuminen, jossa rengaspalaset järjestyvät uudelleen ja tämä kokoonpuristuma jää pysyväksi (kuva 17) (Humphrey ym. 1993). Syklisessä kuormituksessa primäärisen painuman käyttäytymistä on vaikea ennakoida, koska suuri kuormitus tai suuret yksittäiset rakenteeseen kohdistuvat kuormitusyhdet saattavat aiheuttaa staattiseen kuormitukseen poikkeavia suuria primäärisiä muodonmuutoksia, jotka vähentävät sekundäärisen muodonmuutoksen suuruutta. Tähän vaikuttavat kuormitusyhtien suuruus ja taajuus, rakenteen esitiivistys, vesipitoisuus, rakeisuus ja yläpuolisen rakenteen aiheuttama esijännitystila (Humphrey ym. 1993).



Kuva 17. Periaatteellinen kuva, jossa on simuloitu jännityksen vaikutusta rengasrouheen kokoonpuristuvuuteen. Muodonmuutos alkaa rakentamisen aikaisesta alkutiivistämisestä, joka ei palaudu. Primäärinen painuma voi aiheutua dynaamisesta tai staattisesta kuormituksesta, joka ei palaudu, koska materiaalissa tapahtuu uudelleenjärjestymistä. Sekundäärinen painuma on palautuvaa painumaa, mutta riippuvainen kuormituksen suuruudesta. Pysyvä muodonmuutos tapahtuu, kun rakenne alkaa leikkausvoiman tai virumisen takia pysyvästi kokoonpuristua. (Törnqvist 2012, ei julkaistu).

Taipumista tai elastisesta painumasta johtuvat muodonmuutokset ovat palautuvia myös syklisen kuormituksen vaikutuksesta (Drescher ym. 1999; Bernal ym. 1996; Nickles, 1995). Pitkän aikavälin tarkastelussa kuormitusvaikutus kohdistuu materiaaliin virumana, joka kirjallisuustietojen perusteella muuttuu merkityksettömäksi kahden ensimmäisen vuoden jälkeen (kuva 17) (Drescher ym. 1999). Pitkän aikavälin kokoonpuristuvuus tapahtuu tyypillisesti ensimmäisen 50 vuorokauden aikana 60 prosenttisesti oletuksella, että maksimikuormitus kohdistuu alusta alkaen rakenteeseen (Wartman ym. 2007). Granulaatissa muodonmuutokset ovat pienempiä johtuen pienemmästä raekoosta verrattuna rengasrouheeseen (Humphrey ym. 1993). Molemmat materiaalit saavuttavat maksimikokoonpuristuvuuden varsin pienillä kuormituksilla.

### 3.4.3 Kimmomoduuli

Kimmomoduuli kuvaa aineen kykyä vastustaa sitä muovaavia voimia. Kimmomoduulin yksikkö on Pascal tai N/m<sup>2</sup>. Elastiset kertoimet määritellään kappaleeseen kohdistuvan jännityksen ja venymän (puristuman) suhteena. Elastinen kerroin voidaan määrittää kaavasta 4:

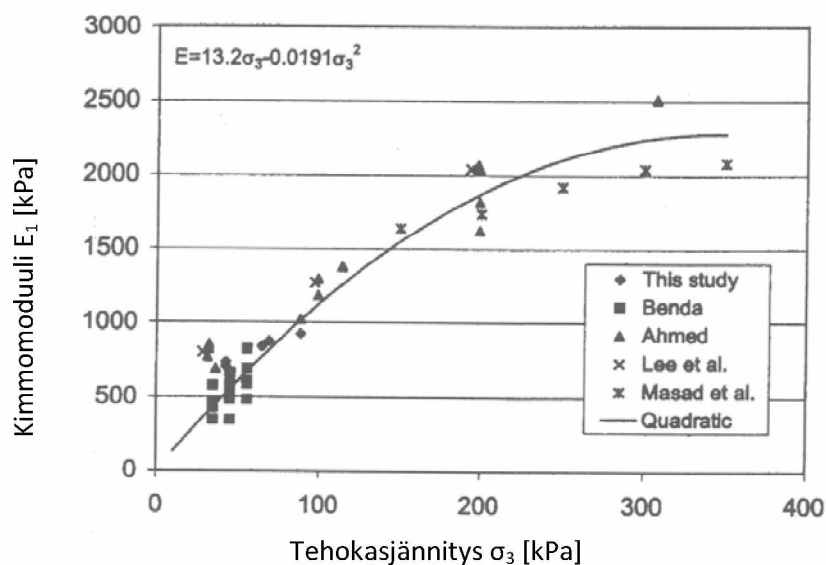
$$\lambda = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} \quad (4)$$

missä  $\lambda$  on elastinen kerroin,  $\sigma_1$  on pystyjännitys ja  $\varepsilon_1$  on suhteellinen pystysuuntainen venymä.

Kimmomoduuli  $E$  on yksi elastisesta kertoimesta käytetty termi. Kimmomoduuli kuvaa kappaleen venymistä venyttävän voiman vaikutuksesta. Jos kappaleen kimmo-kerroin on vakio, se noudattaa Hooken lakia. Tämä ehto täyttyy vain jännitysvenymäkäyrän alkuosassa, ennen kuin kappale alkaa muovautua plastisesti. Kun vetosauvaa kuormittava jännitys on kimmorajaa pienempi, sauva venyy kimmoisasti eli palautuu alkuperäiseen muotoonsa jännityksen loputtua. Jos jännitys on niin suuri, että saavutetaan plastinen alue, kappaleeseen aiheutuu jännityksestä pysyvä muodonmuutos. Yleisesti tarkasteltuna kimmomoduulia pidetään vakiona kiviainestyyppisille materiaaleille tiettyyn jännitystilaan asti, vaikka se ei sitä olekaan (Terzaghi & Peck 1967).

Rengasrouheen kimmomoduulia ovat tutkineet mm. Ahmed (1993), Benda (1995), Mased (1996), Lee (1999) ja Edeskär (2006). Yang (2002) ja Edeskär (2006) ovat yhdistäneet tulokset kuvaan 18 ja taulukkoon 2 eri tutkimuksista. Kirjallisuustietojen voidaan laskennallisessa mitoituksessa käyttää 110 kPa:iin esijännitetyssä rakenteessa rengasrouheen kimmomoduulina 1 MPa:a fraktiosta riippumatta (Edeskär 2006).

Rakenteellisen kuormituksen vaikutuksesta Beattyn (1981) mukaan rengasrouhe pysyy saavuttamaan yli 5 MPa:n kimmomoduulin. Oletuksena on, että kuormitus kohdistuu rengasrouheen jäykisteen tasoa vastaan kohtisuorasti.



Kuva 18. Jännityksen vaikutus rengasrouheen kimmomoduuliin, joka määritetään rengasrouheen jäykisteen tasoa vastaan kohtisuoraan. (Yang ym. 2002)

Taulukko 2. Humphreyn & Sandfordin (1993) määrittämät kimmomoduulit  $E$  ja Poissonin luvun arvot 110 kPa:n jännitystilassa eri rengasrouhemateriaali-fraktioille 110 kPa:n jännitystilassa

Materiaalin raekoko [mm]	Jännitystila $\sigma_1$ [kPa]	Kimmomoduuli $E_1$ [MPa]	Poissonin luku $\nu$ [-]
38	110	0.770	0.32
51	110	1.120	0.20
51	110	1.250	0.30
76	110	1.130	0.28

### 3.5 Lämmönjohtavuus

Kirjallisuuden perusteella rengasrouheen lämmönjohtavuus vaihtelee välillä 0.14...0.32 W/m K (Shao & Sarling 1995; Humphrey ym. 1997). Humphreyn (1997) mukaan jännitystilan kasvaessa lämmönjohtavuus alenee huokostilan alenemisesta johtuen (kuva 19). Kuivatusrakenteessa, jossa vesi pääsi rengasrouheeseen vapaasti, ei kuitenkaan paineellisesti, on keskimäärin 6 % suurempi lämmönjohtavuus kuivaan rengasrouheeseen verrattuna. Vastaavasti jäätyneen rengasrouhenäytteen lämmönjohtavuus on 10 % suurempi jäätyttömään näytteeseen verrattuna (Edeskär 2006). Kirjallisuuden perusteella vesipitoisuudella, jännitystilalla ja fraktiokoolla on varsin pieni vaikutus rengasrouheen lämmönjohtavuuteen (Humphrey ym. 1997).

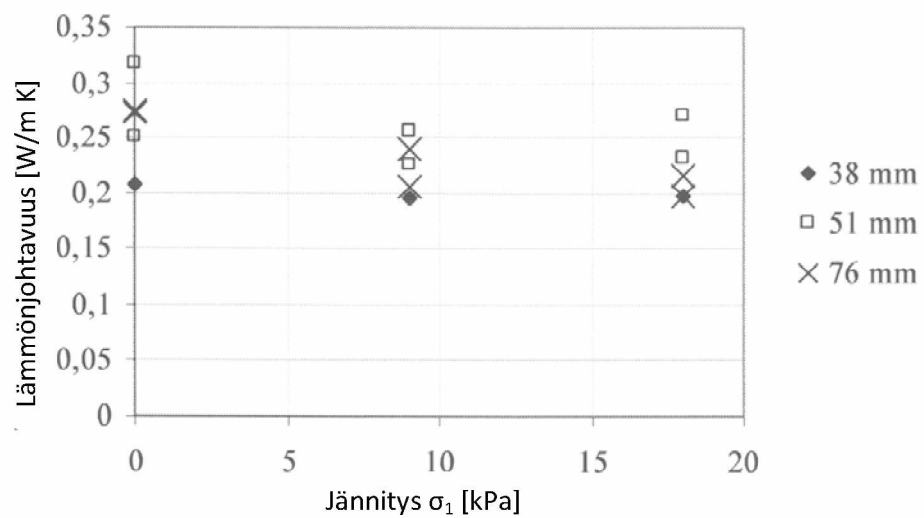
Rengasrouheen lämmönjohtavuus on keskimäärin 30..50 % maa-aineksen lämmönjohtavuutta pienempi. Lämmönjohtavuus on riippuvainen mm. palakoosta/raekoosta ja tiiviysasteesta. Taulukossa 3 on verrattu rengasrouheen ja maa-aineksien tyypillisiä lämmönjohtavuuskertoimia.

Taulukko 3. Rengasrouheen, saven, hiekan, soran ja kevytsoran lämmönjohtavuuden kertoimia

Materiaali	Rengasrouhe*	Savi	Hiekka	Sora	Kevytsora
Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/Km]	0.14...0.32	1.25...1.7	1.25...2.5	0.5...2.5	0.15

Huom. \* Rengasrouheen lämmönjohtavuus on riippuvainen mm. palakoosta/raekoosta. (Kubo 1997; Humphrey & Eaton 1993; RIL Pohjarakennusohjeet1988).





Kuva 19. Jännityksen vaikutus rengasrouheen lämmönjohtavuuteen kolmella eri raekoolla (38 mm, 51 mm ja 76 mm). (Humphrey ym. 1997)

## 4 Rengasrouheen käyttäminen ratapenkereen tukikerroksen alapuolella

### 4.1 Yleistä

Tämän kirjallisuusselvityksen yhtenä tavoitteena oli selvittää, voidaanko kierrätys-rengasmateriaalia käyttää ratarakenteissa. Rengasrouhetta on käytetty ratarakenteissa tärinä vaimentamiseen, mutta tietoa ja tuloksia näistä sovelluskohteista oli käytettävissä varsin vähän. Mikäli rengasrouhetta tullaan käyttämään radan ja raideliikenteen aiheuttaman tärinän vaimentamiseen, edellyttää sen toteuttaminen lisätietojen hankkimista tai kokeellista tutkimusta. Lisäksi kirjallisuuden avulla tarkasteltiin hypoteesia, jossa rengasrouheen avulla voitaisiin alentaa tai poistaa tukikerroksen routimisesta johtuvia vaikutuksia.

Hypoteesi oli, että kimmoisesti kokoonpuristuvan rengasrouheen tai rengasgranulaatin huokostilassa jäätyvän veden jäätymislaajenemisesta osa saataisiin purkautumaan ennen veden jäätymisvaihetta mahdollistamalla kiteytyvän veden virtaus siten, ettei paantamisjäätyminen aikaansaisi ratarakenteen yläpinnan haitallista kohoamista. Tätä kirjoitettaessa itse perushypoteesi on testaamatta. Tässä luvussa keskitytään tarkastelemaan sitä, kuinka paksu ja kuinka jäykkä kierrätysrenkaasta tehty kerros saa olla, että sulan kumirouhekerroksen mahdollistavat muodonmuutokset pystyisivät ottamaan vastaan veden jäätymislaajentumisen vaikutukset ratapenkereessä. Lähtökohdaksi on asetettu penkereen palautuvan siirtymän rajoittaminen liikenteen vaikutuksesta 5 mm:iin (Rato 3 2008). Selvityksen tueksi tehtiin laskelmia kolmelle eri granulaatin kerrospaksuudelle, viidelle pengerpaksuudelle ja viidelle granulaattikerroksen kimmomoduulille.

### 4.2 Rengasrouheen materiaaliominaisuuksien vaikutuksia ratarakenteisiin

Rengasrouheen käyttäytymiseen ratarakenteessa tukikerroksen alapuolella vaikuttavat keskeisimmät materiaaliominaisuudet tai tekijät ovat tiheys, kokoonpuristuvuus, rakenteen hydraulinen johtavuus, huokoisuus, lämmönjohtavuus ja tiivistyvyys. Näiden painoarvoa ja vaikutusta toisiinsa on arvioitu taulukossa 4. Humphrey ja Sandford (1993) ovat tarkastelleet rengasrouheen materiaaliominaisuuksien muutoksia ja keskinäistä vaikutusta 40 kPa:n ja 110 kPa:n kuormituksissa (Humphrey & Sandford 1993).

Rengasrouheen toimintaan vaikuttavia tekijöitä on tutkittu kuormitustilanteissa, jotka eivät täysin vastaa ratapenkereessä Suomessa vallitsevaa jännitystilaa. Lisäksi jäätymisen vaikutusta rengasrouheen eri materiaaliominaisuuksiin on tutkittu varsin vähän, minkä vuoksi tiedot perustuvat varsin vähäiseen kirjallisuusaineistoon. Kirjallisuudesta on käytettävissä pieni määrä tuloksia rakenteista, jotka ovat vertailukelpoisia keskenään, siksi eri vaikuttavien tekijöiden/materiaaliominaisuuksien keskinäinen riippuvuus on joiltakin osin tietojen yhdistämistä. Näistä syistä tarkastelua ei voitu tehdä kattavasti. Näitä tekijöitä on tarkasteltu lähemmin seuraavissa alaluvuissa.

Painoarvoltaan merkityksellisin tekijä ratarakenteen palautuvan muodonmuutoksen vaikutus ratapenkereen tukikerroksen yläpintaan, mikä on asetettu hypoteesissa reunaehdoksi. Muodonmuutos saa olla maksimissaan 5 mm (Rato 3 2008). Keskeisimpiä ja toisistaan riippuvia materiaaliominaisuuksia muodonmuutoksen suuruuden kannalta ovat huokoisuus, kokoonpuristuvuus ja tiivistyvyys. Hydraulinen johtavuus ja lämmönjohtavuus ovat painoarvoltaan vähemmän merkityksellisiä, tai niiden vaikutusta ei kirjallisuustietojen perusteella tunneta riittävästi. Taulukossa 4 on tarkasteltu eri materiaaliominaisuuksien ja tekijöiden vaikutusta toisiinsa 40 kPa:n jännityksessä.

*Taulukko 4. Rengasrouhemateriaalin keskeisimpien materiaaliominaisuuksien vaikuttavuus toisiinsa ratapenkereessä tukikerroksen alapuolella. Materiaaliominaisuuksia on tarkasteltu 40 kPa:n vertikaalikuormituksen vaikutuksessa. (\*\*) merkittävä vaikutus, (\*) vaikuttaa, (0) ei vaikutusta, (?) vaikutus on epäselvä ja (/) vaikutusta ei tiedetä. (Modifioitu Edeskär 2006)*

	Jänni- tystila	Fraktion koko	Vesipi- toisuus	Tiivis- tystyö	Kuormi- tuksen syklisyys	Esikuormi- tuksen aiheuttama pysyvä muodon- muutos	Jäätymi- nen
Tiheys <sup>1)</sup>	**	*	*	**	*	0	0
Kokoonpuristu- vuus <sup>1)</sup>	**	*	0	*	*	0	?
Hydraulinen. johtavuus <sup>1)</sup>	0	0	0	0	0	0	?
Huokoisuus <sup>1)</sup>	**	*	0	**	*	0	0
Lämmönjohta- vuus <sup>1)</sup>	*	*	*	0	0	0	0
Tiivistyvyys <sup>1)</sup>	/	**	*	**	/	/	0

Huom. 1) 40 kPa:n kuormituksessa.

### *Tiheys*

Tiheys on materiaaliominaisuus, jonka avulla pystytään kohtalaisen helposti selvittämään, kuinka paljon tiivistystyö on vaikuttanut rengasrouhemateriaalin tiivistymiseen. Lisäksi tiheys kuvaa siitä, kuinka hyvin rengasrouhepalaset ovat järjestyneet keskenään, koska tiheyden vaihtelu on vähäistä kivennäismaa-ainekseen verrattuna. Tiheyden suureneminen kuormituksen vaikutuksesta kuvaa rengasrouheen alkutiivistymistä ja jossakin tapauksessa myös osaa primäärisestä painumasta riippuen kuormituksen suuruudesta ja kuormitustyyppistä sekä siitä, onko käytetty staattista vai syklistä kuormitusta. Tiheyttä materiaaliominaisuutena voidaan hyödyntää jatkotutkimuksissa tai kentällä tehtävissä kokeissa. Tiheyden avulla pystytään varmistumaan siitä, milloin tiivistämistyön vaikutus on riittävä ja rengasrouherakenne pystyy toimimaan suunnitellusti.

### *Kokoonpuristuvuus ja tiivistyvyys*

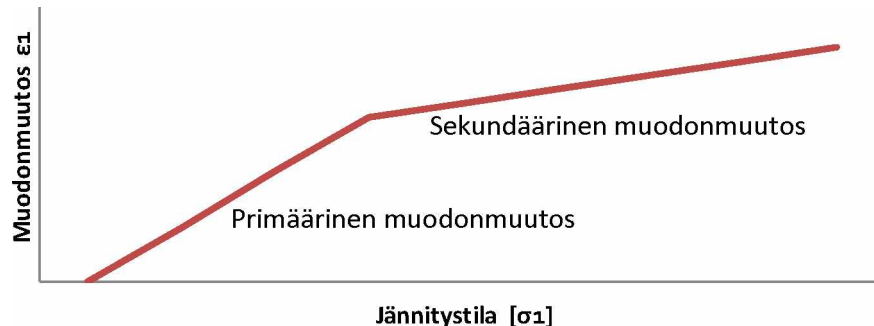
Kimmomoduulin avulla voidaan arvioida/laskea rengasrouheen muodonmuutoksen suuruutta ratapenkereen pinnassa. Kirjallisuuden perusteella voidaan todeta, että 110 kPa:n jännitystilassa yli 50 mm:n rengasrouhefraktio saavuttaa hyvin todennäköisesti 1 MPa kimmomoduulin (Humphrey & Sandford 1993). Humphreyn & Sandfordin (1993) mukaan tämä perustuu 1-D oletukseen, jossa vertikaalisen kuormituksen vaikutus on oletettu merkityksettömäksi. Kimmomoduulia voidaan kasvattaa käyttämällä rengasrouheen kanssa kiviainesta, jolloin kiviaineksen rengasrouhetta pienemmän kokoonpuristuvuuden vaikutuksesta kimmomoduuli kasvaa (Sorbal ym. 2003). Kirjallisuustietojen kimmomoduulia on kasvatettu mm. sementin avulla (mm. Lee ym. 1999; Danch ym. 2004). Lisäaineiden ja rengasrouheen sekoitusprosessista tai sekoitussuhteesta ei ole kirjallisuudesta käytettävissä sellaista tietoa, joka tukisi tätä selvitystä tai jota voitaisiin soveltaa käytettäväksi sellaisenaan.

Rakenteen jännitystä voidaan kasvattaa lisäämällä staattista kuormaa rengasrouhekerroksen yläpuolelle, jolloin tapahtuu primääristä kokoonpuristumista (kuva 20). Samalla rakenteen kimmomoduuli kasvaa, mikäli staattinen lisäkuormitus säilyy vakiona tai riittävän suurena. Jos rakenteen kimmomoduulia halutaan kasvattaa, se pienentää rakenteen huokoisuutta ja siten vaikuttaa hydrauliseen johtavuuteen ja lämmönjohtavuuteen. Rakenteen käyttöiän alussa syklisen kuormituksen vaikutuksesta tapahtuu rengasrouheen uudelleenjärjestymistä, joka vaikuttaa kimmomoduuliin, mutta sen vaikutuksen suuruutta ei pysty lähdetietojen perusteella arvioimaan (Humphrey ym. 1997).

Kokoonpuristuvuus on riippuvainen yläpuolisen kuormituksen aiheuttamasta jännitystilasta. Kokoonpuristuminen tapahtuu kahdessa vaiheessa tiivistystyön tai alku-kuormituksen aiheuttamana primäärisenä kokoonpuristumisena ja lisäkuormituksen aiheuttamana sekundäärisenä kokoonpuristumisena (kuva 20). Kokoonpuristuminen on keskeinen tekijä, kun arvioidaan rengasrouheen toimivuutta ratarakenteessa tukikerroksen alapuolella.

Sekundäärinen kokoonpuristuminen on palautuvaa kokoonpuristumista, jossa kumi-partikkelit muuttavat muotoaan ja palautuvat takaisin samaan tilaan. Muodonmuutoksessa partikkelin tilavuus ei muutu vaan ainoastaan sen muoto muuttuu esimerkiksi horisontaalisen kuormituksen vaikutuksesta vertikaalisesti laajentuen tai huokoisiin laajentuen (Humphrey ym. 1992, Yang ym. 2002). Virumisen, jolla tässä yhteydessä tarkoitetaan jännityksen aiheuttamaa pysyvää muodonmuutosta, lisääntyminen alentaa sekundääristä kokoonpuristumista, koska partikkelit deformatuvat pysyvästi (Yang ym. 2002). Tämän tekijän pitkäaikaisvaikutus tai suuruus ei ole arvioitavissa kirjallisuustietojen perusteella.

## Jännitystilän vaikutus muodonmuutokseen



Kuva 20. Periaatteellinen kuva jännitystilän vaikutuksesta kierrätysrenkas-materiaalien muodonmuutokseen. Primäärinen muodonmuutos on jännityksestä riippuva ja palautumatonta, mikäli jännitys jää vaikuttamaan rakenteeseen. Sekundäärinen muodonmuutos on palautuvaa muodonmuutosta syklisen kuormituksen vaikutuksesta. (Humphrey ym. 1997)

Tiivistymistä tapahtuu rengasrouheessa yläpuolisen kuormituksen vaikutuksesta, joka voi olla staattista tai dynaamista l. syklistä kuormitusta. Kirjallisuuden perusteella tiivistyminen tulee tapahtumaan staattisen kuormituksen vaikutuksesta hitaammin sykliseen kuormitukseen verrattuna, joten rakenteen palaset voivat järjestyä nopeasti uudelleen (Wartman ym. 2007). Kirjallisuudessa on poikkeavia arvioita syklien määrästä ja vaikutuksesta, koska kuormituksen suuruus vaikuttaa rakenteen virumiseen eikä tätä tekijää ei pystytä määrittämään lähdetietojen perusteella aukottomasti.

Rakenteen tiivistyminen muuttaa huokoisuutta, kokoonpuristuvuutta ja hydraulista johtavuutta. Kirjallisuustietojen perusteella ei ole määritettävissä, mikä osa kokoonpuristumasta on rakenteen tiivistymistä ajan funktiona ja mikä virumaa. Nämä asiat tulee selvittää laboratoriokokein raideliikenteen aiheuttamilla kuormituksilla.

### Hydraulinen johtavuus

Rengasrouheen hydraulinen johtavuus on kaikissa fraktioissa kuormituksesta riippumatta kivennäismaa-ainesta suurempi. Voidaan olettaa, että ratarakenteessa tukikerroksen alapuolella rengasrouhe on osittain kyllästyneessä tilassa, joten osa huokosista ei ole veden kyllästämänä. Osittain kyllästyneen tilan hydraulinen johtavuus on kyllästysasteesta riippuen merkittävästi suurempi verrattuna täysin kyllästyneen tilan hydrauliseen johtavuuteen (Rowe & Isaac 2005).

### Huokoisuus

Huokoisuus on yhteydessä lähes kaikkiin tässä tarkastelussa oleviin tekijöihin. Huokoisuuden vaikutuksesta sekundääriseen painuman aiheuttama muodonmuutos pystyy ”laajentumaan” ja palautumaan takaisin alkuperäiseen muotoonsa. Huokostilavuuden pienentäminen johtaa hydraulisen johtavuuden heikentymiseen, mutta rengasrouheen hydraulinen johtavuus on tässä tarkastelukuormituksissa aina kivennäismaa-ainekseen verrattuna suurempi ja tällä perusteella riittävä. Huokoisuus riippuu rengasrouheen fraktiosta ja sen vaihtelu on erittäin suurta kivennäismaa-ainekseen ver-

rattuna eri kuormituksilla. Suuremmissa fraktioissa ( $> 200$  mm) rengasrouheen sekaan jää merkittävä osa renkaan teräs- ja kuituvahvikkeita, jotka voivat jäykistää rakennetta ja siten vähentää kuormituksen aiheuttamaa huokoisuuden pienentymistä (Humphrey ym. 1993).

#### *Lämmönjohtavuus*

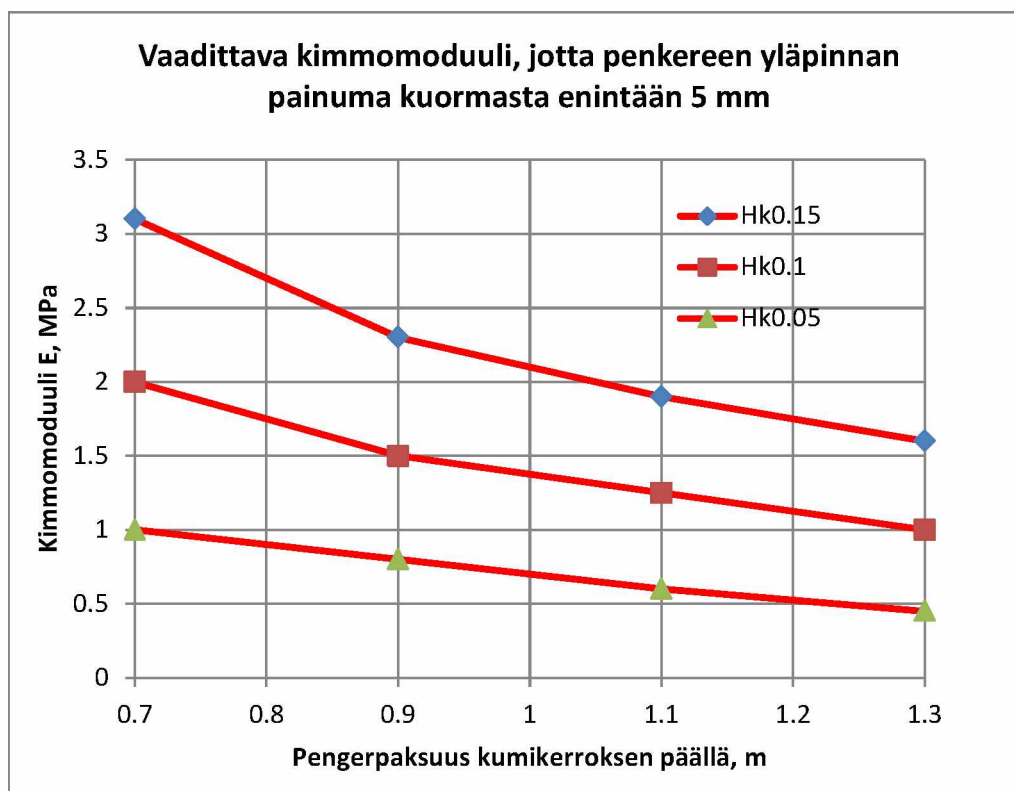
Rengasrouheen lämmönjohtavuus on samaa suuruusluokkaa kuin kevytsoran. Lämmönjohtavuus ei kuitenkaan ole tässä tarkastelussa keskeisessä roolissa.

## 4.3 Rengasrouherakenteen vaikutus mitoituslaskelmiin

Tämän kirjallisuusselvityksen laskelmien tarkoituksena oli tukikerroksen paksuuden ja rengasrouhekerroksen paksuuden simulointi kimmomoduuliin  $5$  mm maksimipainumalla ratapenkereen päällä oletetulla maksimikuormituksella. Kirjallisuustietojen perusteella voidaan todeta kimmomoduulin saavuttavan  $1$  MPa:n arvon n.  $100$  kPa:n jännitystilassa  $50$  mm:n materiaalifraktiolla. Tässä tarkastelussa vaaditun kimmomoduulin alarajaksi asetettiin  $1.5$  MPa. Mitoituslaskelmien osalta tämä johtaa tulokseen, jossa  $50$  mm:n rengasrouhekerrosta voidaan käyttää yli  $0.7$  metrin vahvuisen kivennäispenkereen alapuolella,  $100$  mm:n rengasrouhekerrosta voidaan käyttää yli  $0.9$  metrin vahvuisen kivennäispenkereen alapuolella ja  $150$  mm:n rengasrouhekerrosta voidaan käyttää vain yli  $1.3$  metrin vahvuisen kivennäispenkereen alapuolella (kuva 21).

Mitä nämä reunaehdot vaikuttavat materiaalivalintaan ja materiaalin ominaisuuksiin:

- maksimifraktio
- valitun fraktion kimmomoduuli, kokoonpuristuvuus ja huokoisuus
- hydraulinen johtavuus
- materiaalin säilyminen
- käytännön rakennettavuus



Kuva 21. Pengerpaksuuden vaikutus rengasgranulaattikerroksen päällä eri rakennekerrospaksuuksilla, 50 mm (Hk 0.05), 100 mm (Hk 0.1) ja 150 mm (Hk 0.15), suhteessa kimmomoduuliin. Rakenteen yläpinnan suurin sallittu painuma on määritetty 5 mm:n suuruiseksi. (Luonnosmuistio 2012)

#### 4.3.1 Rengasrouheen fraktionvalintaperusteet

Granulaattifraktio, jota voidaan käyttää 150 mm:n vahvuiseen rakennekerrokseen, tulee olla maksimiraekooltaan välillä 1/6...1/5 osan rakenteen kokonaispaksuudesta. Tämän tiedon tukemana 150 mm:n rakennekerroksen maksimiraekoko voi olla 25...30 mm, 100 mm:n rakennekerroksen 15...20 mm ja 50 mm:n rakennekerroksen 8...10 mm. Maksimiraekoon suhde rakennekerroksen paksuuteen perustuu hydraulisen johtavuuden säilymiseen rakenteessa (Laaksonen ym.2003). Lisäksi rakennettavuuden kannalta tarkasteltuna maksimiraekoon pitää olla huomattavasti pienempi kuin rakenteen kerrospaksuuden. Kaikki nämä maksimiraekokofraktiot ovat teknisesti mahdollisia valmistaa.

#### 4.3.2 Fraktion vaikutus kimmomoduuliin, kokoonpuristuvuuteen ja huokoisuuteen

Kirjallisuuden perusteella alle 50 mm:n granulaatti ei täytä vaadittua 1.5 MPa:n kimmomoduulin vaatimusta eikä pienimmistä fraktioista ole käytettävissä tutkimustuloksia (Yang 2002). Edeskärin (2006) mukaan rengasrouhe, jonka fraktio on 50\*50 mm<sup>2</sup>, pystyy saavuttamaan 1.5...2.0 MPa:n kimmomoduulin. Kirjallisuudessa on tarkasteltu yli 20 kPa:n jatkuvassa kuormitusvaikutuksessa olevaa rengasrouhekerrosta, joka on saavuttanut yli 5 MPa:n kimmomoduulin (Beatty 1981).

Näissä tutkimuksissa esitiivistyksen vaikutusta kimmomoduuliin ei ole huomioitu (Beatty 1981; Yang 2002; Edeskär 2006). Esitiivistyksen vaikutus rakenteen kimmoiseen muodonmuutokseen täytyy selvittää, ennen kuin rakennepaksuus ja fraktio voi-

daan valita. Kimmomoduulin tutkimustulokset ovat osin ristiriitaisia keskenään, mikä johtuu todennäköisesti materiaalifraktioiden eroista. Kokoonpuristuvuus ja huokoisuus täyttävät kirjallisuuden perusteella vaatimukset riittävästi niin, että rakenne pysyisi ottamaan yläpuolisen kuormituksen vastaan (Yang ym. 2002; Humphrey ym. 1993). Yangin (2002) ja Humphreyn (1993) tekemissä tutkimuksissa materiaalina oli käytetty rengasrouhetta, jonka raekoko oli kummassakin tutkimuksessa yli  $100 \times 100 \text{ mm}^2$ . Tämän perusteella Yangin (2002) ja Humphreyn (1993) tutkimuksen tuloksia ei voida käyttää sellaisenaan, koska tutkimuksissa käytetty maksimifraktio on liian suuri laskelmien kerrospaksuuteen nähden.

#### **4.3.3 Hydraulinen johtavuus**

Alle 50 mm:n fraktiot eivät vaikuta merkittävästi hydraulisen johtavuuden pienenemiseen (Humphrey ym. 1993).

#### **4.3.4 Materiaalin säilyminen**

Paksuudeltaan 100 mm tai 150 mm olevat rakennekerrokset tulee suojata yläpuoleltaan esimerkiksi suodatinkankaalla, ettei tukikerroksen kiviaines pääse sekoittumaan alapuoliseen rakennekerrokseen. Lisäksi alapuolisen pohjamaan pinnan tulee olla tasainen, ettei rengasgranulaattirakenteen kerrospaksuus ylitä laskelmassa määritettyä sallittua kerrospaksuutta. Jatkosuunnittelussa pitää tarkastella sitä, onko suodatin-kankaan käyttäminen myös granulaattikerroksen alapuolella materiaalien sekoittumisen estämiseksi välttämätöntä, mikäli rengasgranulaatin alapuolella käytetään kii-laustyyppisesti hienojakoista kiviaineista.

#### **4.3.5 Käytännön rakennettavuus**

Materiaalin asentaminen työkohteeseen on keskeisessä asemassa rakennekerroksen paksuuden vallinnassa. Käytännön maarakentamisessa alle 10 mm:n toleranssin asettaminen koneellisesti levitettävälle materiaalille ei ole realistista, mikä tarkoittaa, että vahvuudeltaan 50 mm olevaa rengasgranulaattikerrosta ei voida käytännön rakennus-teknisistä syistä todennäköisesti valita.

Rengasgranulaatin levittämiseen voidaan käyttää levitintä, joka on kiinnitetty kauha-kuormaajaan, jossa on jatkuva levitettävän pinnankorkeuden säätö- ja seurantamahdollisuus. Kerrospaksuuden tasaisuudella on suuri merkitys rakenteen toimivuuden kannalta, koska 10 mm:n kerrospaksuuden vaihtelulla on prosentuaalisesti merkittävä vaikutus rakenteen kokonaispaksuuteen.

Rengasgranulaattikerros tulee tiivistää ennakkokokeiden tuloksien mukaisesti, jolloin primäärinen painuma saadaan aikaan materiaalin asennusvaiheessa. Lisäksi yläpuolinen tukikerros tulee rakentaa siten, ettei primäärinen painuma pääse palautumaan eikä sekundäärinen painuma pääse kasvamaan.

#### **4.3.6 Selvitettäväksi jääviä tekijöitä**

Selvitystyö voitaisiin jakaa kahteen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa ensin testataan laboratorio-olosuhteissa tässä kirjallisuuskatsauksessa avoimeksi tai osin epäselväksi jäävät rakenteeseen ja materiaaliominaisuuksiin liittyvät tekijät (taulukko 5). Laboratoriossa tulisi pystyä simuloimaan vallitsevia olosuhteita varsinaisessa olettetussa koerakennekohteessa riittävän pitkällä aikajänteellä, jolloin olosuhteiden muutoksien vaikutus rakenteelliseen toimivuuteen pystyttäisiin varmistamaan mah-



dollisimman hyvin etukäteen. Tässä yhteydessä – ennen materiaaliominaisuuksienkin mittausta – itse perushypoteesi paantamisroutanousun eliminoimisesta tulee selvittää laboratoriomittakaavassa.

Ensimmäisen vaiheen jälkeen, jolloin laboratoriossa on saatu luotettavat testaus- ja simulointitulokset sekä varmistettu hypoteesin toteutumisesta suunnitellusti, laaditaan mitoitussuunnitelmat. Mitoitussuunnitelmassa tulee huomioida instrumentoinnin merkitys koerakenteessa, jonka perusteella pystyttäisiin reaaliaikaisesti saamaan mittausinformaatiota koerakentamiskohteesta tai kohteista. Koerakenteen kestossa on olennaista riittävän pitkä aikajänne, koska nykyisin ei pystytä etukäteen ennakoimaan talven kestoa ja vuosien keskinäistä vaihtelua, pakkasjakson kestoa tai sen aiheuttaman routimisen syvyyttä. Välttämättä joka talvi tavoiteltua paannejäättä ei muodostu rakenteeseen ja rengasgranulaatin huokoisuuden vaikutus saattaa muuttaa tarkastelutilannetta suuntaan tai toiseen mm. granulaatin suuren hydraulisen johtavuuden vuoksi.

Taulukossa 5 on kuvattu materiaaliominaisuuksia/tekijöitä ja niiden keskinäisiä syyseuraussuhteita sekä sitä onko kirjallisuustietojen perusteella käytettävissä riittävästi tietoa tekijän vaikutuksista oletettuun rakenteeseen vai tulisiko laboratoriotutkimuksien avulla hankkia lisätietoa. Oletuslähtökohtana on 100 mm:n vahvuinen granulaatin kerrospaksuus, jota kuormitetaan VTT:n tekemien laskelmien mukaisesti 0.9 metrin tukikerroksen ja maksimikuormituksen aiheuttaman kuormitusjakauman mukaisesti interpoloituina 73 kPa:n muuttuvalla junakuorman aiheuttamalla maksimijännityksellä. Penkereen kimmomoduuli on 175 MPa ja rengasgranulaatin rakenteellinen vaadittu kimmomoduuli 1.5 MPa sekä penkereen yläpinnan sallittu maksimisiirtymä 5 mm.

Riittävästi tunnettuja tai merkitykseltään vähäisiä tekijöitä ovat tiheys, hydraulinen johtavuus ja lämmönjohtavuus. Tiheys pystytään määrittämään muiden tekijöiden ohessa laboratoriomäärittämisestä. Hydraulinen johtavuus on käsitteenä tunnettu, koska siihen liittyvää tutkimusta on runsaasti käytettävissä, mikä johtuu rengasrouheen käyttämisestä mm. kaatopaikkojen kuivatusrakenteena. Lämmönjohtavuudella on ratarakenteen kokonaisuuden kannalta merkitystä, mutta tässä vaiheessa se sivuutetaan merkitykseltään sekundäärisenä tekijänä.

Kokoonpuristuvuus, huokoisuus ja tiivistyvyys ovat kaikki varsin läheisesti toisiinsa liittyviä materiaaliominaisuuksia/tekijöitä, joista ei ole kokonaisuutena käytettävissä riittävästi tietoa rakenteen toiminnalliseen kokonaisarviointiin, rakenteelliseen mitoitukseen eikä rakenne- ja työsuunnitteluun. Merkittävin puuttuva tieto on tiivistyvyys ja siihen käytetty tiivistämistyön määrä, joista ei ole kirjallisuuden perusteella juuriakaan tietoa käytettävissä. Tiivistymisen vaikutukset ovat eri fraktioilla suorassa suhteessa kimmomoduuliin, kokoonpuristuvuuteen ja huokoisuuteen. Lisäksi primääritiivistymiseen vaikuttavan syklisen tiivistymisen ja virumisen välinen suhde on täysin avoimena oleva asia, jolla on rakenteen käyttöikämitoituksen tarkastelussa suuri merkitys. Virumisella tarkoitetaan tässä yhteydessä pysyvää muodonmuutosta huokostilassa primäärisen painuman jälkeen.

*Taulukko 5. Valitun rengasgranulaattimateriaalin ominaisuuksia ja tekijöitä sekä niiden syy-seuraussuhteita. Lisäksi tarkastellaan sitä, onko kirjallisuustietojen perusteella käytettävissä riittävästi tietoa tekijästä vai tulisiko sitä selvittää lisää (\*\*) tekijä tunnetaan eikä tarvita lisäselvitystä, (\*) tekijä tunnetaan ja tarvitaan lisäselvitystä, (o)tekijää ei tunneta ja tarvitaan lisäselvitystä, (?) vaikutus on epäselvä ja (/) vaikutuksella ei ole merkitystä.*

	Jänni- tystila	Fraktion koko	Vesipi- toisuus	Tiivis- tystyö	Kuormi- tuksen syklisyys	Esikuor- mituksen aiheut- tama pysyvä muodon- muutos	Jäätymi- nen
Tiheys	**	**	**	*	*	?	**
Kimmomo- duuli	*	*	/	*	*	o	?
Kokoonpu- ristuvuus	**	**	/	*	*	o	?
Hydraulinen johtavuus	**	**	/	/	/	/	**
Huokoisuus	*	*	/	o	o	o	/
Lämmönjoh- tavuus	/	/	/	/	/	/	/
Tiivistyvyys	*	*	/	*	*	o	**

Näiden tekijöiden selvittäminen edellyttää tarkastelua hieman eri lähtökohdista, miten ja mitä kannattaa laboratoriossa selvittää ja minkä perusteella pystytään arvioimaan rakenteen toiminnallinen kokonaisarviointi sekä onko rakenne teknisesti mahdollinen vai ei. Oletuslähtökohta kirjallisuusselvityksen perusteella on, että kimmoduulia kasvattamalla pystytään riittävä huokoisuus säilyttämään 100 mm:n vahvuisella rakenteella siten, että paannejään muodostuminen vähenee, penkereen yläpinnan muodonmuutos pysyy alle 5 mm:ssä ja rakenne säilyy fraktion osalta muuttumattomana sekä rakentaminen on käytännössä toteutettavissa.

## 5 Yhteenveto

Kirjallisuusselvityksen tavoitteena oli tarkastella rengasrouheen ja -granulaatin ominaisuuksia ja arvioida käytettävyyttä erilaisiin tie- ja ratarakentamisen kohteisiin. Lisäksi kirjallisuudesta selvitettiin, saataisiinko kimmoisesti kokoonpuristuvan rengasgranulaatin huokostilassa jäätyvän veden jäätymislaajenemisen aikana osa vedestä purkautumaan siten, ettei paantamisjäätymisen kohottaisi ratapenkereen yläpintaa raideliikennettä haittaavasti.

Kirjallisuusselvityksen tekeminen perustui mm. ulkomaisiin väitöskirjoihin, artikkeleihin, konferenssijulkaisuihin, eri EU-maiden paikallisten rautatieyhtiöiden raportteihin ja selvityksiin sekä materiaali- ja laitetoimittajien materiaaleihin. Tiedonkeruuvaiheessa on oltu yhteydessä muutamaan alan johtavaan tutkijaan tai tutkijaryhmään Yhdysvaltoihin, Ruotsiin ja Etelä-Koreaan sekä materiaalitoimittajiin ja laitevalmistajiin Hollantiin, Saksaan ja Yhdysvaltoihin. Lisäksi Suomessa on tutustuttu toteutettuun kevennysrakenteeseen.

Kierrätysrenkaista kehitetyt materiaalisovellukset perustuvat tyypillisesti kumimateriaalin keveyteen, muodonmuutuskapasiteettiin, suureen hydrauliseen johtavuuteen tai kylmän kestävyyskykyyn. Kierrätysrengasmateriaalin sovelluskohteita ovat tyypillisesti olleet kaatopaikkojen kuivatus- ja kaasunkeräysrakenteet sekä erilaiset kevennysrakenteet, joissa kivennäismaa-ainesta on korvattu erilaisilla rengasrouhe- tai -granulaattijakeilla. Meluvallit ja suojausrakenteet ovat olleet pitkään materiaalmääräisesti suurimpia käyttökohteita, joihin on voitu sijoittaa pitkälti jalostamattomassa muodossa olevia käytöstä poistettuja renkaita. Routasuojausmateriaalina rengasrouheella on koerakentamiskohteissa pystytty vähentämään tierakenteiden routimisen aiheuttamia vaurioita. Tällaisten teknisesti ja mitoituksellisesti yksinkertaisten rakenteiden toteuttaminen johtuu pitkälti siitä, että ei ole olemassa yleisesti hyväksyttyjä ja verifioituja suunnitteluperusteita rakenteelliseen mitoittamiseen.

Rengasgranulaattia on käytetty suojausrakenteissa urheilu- ja nurmikenttien alustoissa. Lisäksi rengasrouhetta ja -granulaattia on käytetty mm. raideliikenteen aiheuttaman tärinän vaimennukseen. Laajamittaisista käyttökokemuksista ei ole kuitenkaan dokumentoitua tietoa saatavilla eikä saatavilla olevan tiedon perusteella ei pystytty arvioimaan toimiiko vastaava rakenne Suomen olosuhteissa.

Kirjallisuustietojen perusteella ei voi arvioida paantamisjäätymiseen liittyvän hypoteesin lopputulosta. Lisäksi kirjallisuuden perusteella ei voida määritellä yksiselitteisesti läheskään kaikkia kierrätysrengasmateriaaleilta ratapenkereen tukikerrokseen vaadittavia materiaaliominaisuuksia, joiden tunteminen on täysin välttämätöntä, ennen kuin pystytään antamaan yksiselitteinen vastaus siihen soveltuvatko kierrätysrengasmateriaalit ratarakenteeseen. Kirjallisuusselvityksen tuloksena on laadittu taulukko puuttuvista rengasgranulaatin materiaaliominaisuuksista ja olosuhteista, joiden perusteella lopullinen vastaus muodostuisi. Voidaan suositella, että laboratorioissa määritettäisiin esitetyn mukaiset kokeet, joiden perusteella voitaisiin arvioida rakenteen toimivuutta.

Yhteenvetona kirjallisuusselvityksestä on laadittu taulukko liitteeseen 1, jossa Infra RYL-litteroinnin mukaisesti on arvioitu kierrätysrengasmateriaalien soveltuvuutta eri rakenteisiin. Taulukkoon on otettu mukaan vain sellaiset rakenteet, joihin tämän kirjallisuusselvityksen perusteella voidaan kierrätysrengasmateriaaleja käyttää.

Mahdollinen ratapenkereeseen sovellettava tuote, joka kirjallisuudesta ilmeni, on kierrätysrengasmateriaalista valmistettu polymeeripölkky. Polymeeripölkkyä on käytetty ratarakenteissa Keski-Euroopassa, Saksassa ja Hollannissa, varsin laajasti, ja kokemukset ovat olleet positiivisia. Kirjallisuustietojen perusteella materiaaliominaisuuksien osalta polymeeripölkky soveltuisi käytettäväksi Suomen olosuhteissa. Näiden tekijöiden perusteella polymeeripölkyn käyttöä Suomen rataverkossa kannattaisi jatkossa selvittää.

## Lähteet

Ahmed, I. 1993. Laboratory Study on Properties of Rubber Soils, Report No. FHWA/IN/JHRP-93/4, Purdue University, West Lafayette, Indiana.

ASTM 2008. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania.

Beatty, J.R. 1981. "Physical properties of rubber compounds". Mechanics of Pneumatic Tires, S.K. Clark, ed., United States Department of Transportation, National Highway Traffic Administration, Washington, D.C.

Benda, C. C. 1995. Engineering properties of scrap tires used in geotechnical applications, Report No. 95-1, Vermont Agency of Transportation, Montpelier.

Bernal, A. 1996. Laboratory Study on the Use of Tire Shreds and Rubber-Sand in Backfills and Reinforced Soil Applications, Report No.: FHWA/IN/JHRP-96/12, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana.

Carrascal, I.A., Casado, J. A., Polanco, J. A., & Cutiérrez-Solana, F., 2006. Dynamic behavior of railway fastening setting pads. Engineering failure Analysis 14 (2007) pp.365-373.

Cho, S-D., Kim, J-M., Kim J-h., & Lee, K-w., 2007. Utilization of Waste Tires to Reduce Railroad Vibration. Materials Science Forum Vols. 544-545 (2007) pp: 637-640.

Cosgrove, T.A. 1995. Interface Strength Between Tire Chips and Geomembrane for Use as a Drainage layer in a Landfill Cover, Proceedings of Geosynthetics'95, Industrial Fabrics Association, St. Paul, Minnesota, Vol. 3, 1995, pp. 1157-1168.

Dai, S-H., Shen F-M., Yu A-B., 2008. Granule Size Distribution and Porosity of Granule Packing. Journal of iron and steel research, International., 2008, 15(5), 01-05.

Danch, A., Sujkowski, W. W., Muczynski, M., Radon, A., Stelzer, F. & Jurga, S., 2004. Structural relaxation and morphology of the rubber-urethane composites. Journal of Applied Polymer Science. Vol. 94, Issue 3, November 2004, pp: 1186-1193.

Drescher, A., Newcomb, D., & Heimdahl, T. 1999. Deformability of Shredded Tires, Minnesota Department of Transportation, January, pp. 145.

Duffy, D.P. 1995. Using Tire Chips as a Leachate Drainage Layer, Waste Age, September 1995, pp. 113 - 122.

Edeskär, T. 2006. Use of Tyre Shreds in Civil Engineering Applications, Technical and Environmental Properties. Luleå University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, 2006:67. pp: 317.

Euroopan Unionin direktiivi 1999/31 EY. Direktiivi kaatopaikoista.

Euroopan Unionin direktiivi 2000/53 EY. Direktiivi romuautoista.

Euroopan Unionin direktiivi 2000/76 EY. Direktiivi jätteen poltosta.

Hairaka, M., Forsman, J., & Sikiö, J., 2011. Kevennysrakenteiden suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 2/2011. Kuopio, pp.48.

Humphrey, D.N., 1997. Civil Engineering Applications of Tire Shreds, A Short Course, prepared for the California Integrated Waste Management Board, 16 June 1997.

Humphrey, D.N., Chen, L.H., & Eaton, R.A. 1997. Laboratory and field measurement of the thermal conductivity of tire chips for use as subgrade insulation, Preprint No. 971289, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Humphrey, D. N., & Eaton, R.A., 1993. Tire chips as insulation beneath gravel surfaced roads. Proc. Frost in Geotechnical Engineering, ed. Phukan, Balkeama, Rotterdam.

Humphrey, D. N., & Eaton, R.A., 1995. Field Performance of Tire Chips as Subgrade insulation for Rural Roads. 6 th International Conference on Low-volume Roads. pp. 77-86..

Humphrey, D.N. & Manion, W.P., 1992. Properties of Tire Chips for Lightweight Fill, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, R.H. Borden, eds., ASCE, Vol. 2, pp. 1344-1355.

Humphrey, D.N., Sandford, T.C., Cribbs, M.M., Gharegrat, H., & Manion, W.P. ,1992. Tire Chips as Lightweight Backfill for Retaining Walls–Phase I, prepared for the New England Consortium, 137 pp.

Humphrey, D.N., & Wolfe, S. L., 1999. Where the Wheel Meets the Rail. Track 4- Research & Development, pp: 2-10.

Kieft, J.G., 2008. Instituut voor Sportaccommodaties B.V. Test report pp. 8.

Kubo, H., 1997. Experiment applying tire chips as frost insulation in concrete channels. Proc. Of the Inter. symposium "Ground Freezing 97", Luleå, Sweden. Rotterdam, A.A. Balkema. pp. 427-432.

Kumar, P., 2007. Investigating the Recycled Rubber Granulate – Virgin Rubber Interface. A thesis submitted to the University of London for the degree of Doctor of Philosophy. PP. 234.

Laaksonen, R., Virtanen, P., Jyrävä, H., & Hämäläinen, J., 2003. Vakioitu menetelmä. Helsinki: Suomen Ympäristökeskus.

Lankhorst-Mouldings 2008. [http://www.lankhorst-mouldings.com/hst/l11h07a/lankhorst.nsf/0/652AB94846B74C8DC125757B00529FBB/\\$FILE/lm%20dwarligger%20broch%20eng.pdf?openelement](http://www.lankhorst-mouldings.com/hst/l11h07a/lankhorst.nsf/0/652AB94846B74C8DC125757B00529FBB/$FILE/lm%20dwarligger%20broch%20eng.pdf?openelement)

Lee, J. H., Sagado, R., Bernal, A., & Lovell, C. W., 1999. Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol 125, No. 2, February, 1999.

Liikennevirasto, 2008. Ratatekniset ohjeet RATO 3. Dnro 1090/041/2008. Helsinki.

Mased, E., Taha, R., Ho, C., & Papagiannakis, T., 1997. Engineering properties of tire/soil mixtures as a lightweight fill material. *Geotechnical testing J.*, 19 (3), pp: 297-304.

Mitchell, J.K. 1993 *Fundamentals of Soil Behavior*. pp. 577.

Moo-Young, H., Sellasie, K., Zeroka, D., & Sabnis, G. 2003. Physical and chemical properties of recycled tire shreds for use in construction. *J. Environmental Engineering*, 129 (10), pp: 921-922.

Myhre, L., & Mackillop, D. A., 2002. Rubber Recycling. *Rubber Chemistry and Technology*, 75, pp: 429-474.

Nehdi, M., & Khan, A., 2001. Cementious Composites Containing Recycled Tire Rubber: An Overview of Engineering Properties and Potential Applications. *Cement, Concrete and Aggregates*, CCAGDP, vol. 23, No. 1, pp. 3-10.

Nickles, W.L., Jr. 1995. The Effect of Tire Shreds as Subgrade Fill on Paved Roads, M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Maine, Orono, Maine.

Pohjarakennusohjeet RIL 121, 1998, Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto.

Reddy, K.R., & Saichek, R. E. 1998. Characterization and performance assessment of shredded scrap tires as leachate drainage material in landfills. *Proc. the fourteenth international conference on solid waste technology and management*, Philadelphia.

Rossetti, S., Gardonio, P., & Brennan, M. J., 2005. A wave model of rigid-frame porous materials using lumped parameter concepts. *Journal of Sound and Vibration* 286 (2005) pp: 81-96.

Rowe, R.K. & Mc Isaac, M. 2005. Clogging of Tire Shred and Gravel Permeated with Landfill Leachate, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, pp. 682-693, Vol. 131, No. 6.

Scheibe, T., 2008. *Railway Sleepers from Mixed Plastic Wastes – RAILWASTE-*. Crossing Borders in Europe by Transnational Research Funding. Berlin.

Shao, J., & Zarling, J. P. 1995. Thermal conductivity of recycled tire rubber to be used as insulation fill beneath roadways, Report N.INE/TRE 94.12, Alaska Dept. of Transportation and Public Facilities, Juneau.

Shulman, V. L., 2004. Tyre Recycling. *Rapra review reports*, expert overviews covering the science and technology of rubber plastics, 7.

Sobral, M., Samagaio, A.J.B., Ferreira, J.M.F., Labrincha, J.A. 2003. Mechanical and acoustical characteristics of bound rubber granulate. *Journal of Materials Processing Technology*  
Volume 142, Issue 2, 25 November 2003, Pages 427-433

Terzaghi, K.T., & R. Peck, 1967. *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley & Sons, 2nd Edition.

Valtioneuvoston asetus 1246/1995. Valtioneuvoston asetus käytöstä poistettujen renkaiden hyödyntämisestä ja käsittelystä annetun valtioneuvoston päätöksen muuttamisesta. Helsinki.

Wartman, J., Natale, M.F., & Strenk, P.M. 2007. Immediate and Time-Dependent Compression of Tire Derived Aggregate, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 3.

Yang, S., Lohnes, R, A., & Kjartson, B. H. 2002. Mechanical Properties of Shredded Tires. *Geotechnical Testing Journal*, 25 (1), pp. 44-52.

Zach, A., 1999. Vibration insulation research results in Switzerland. *Journal of Sound and Vibration* (2000) 231 (3), pp. 877-882.



*Rengasrouheen ja rengasgranulaatin hyödyntämismahdollisuuksia tie- ja ratarakenteissa InfraRYL 2006 litteroinnin toimivuusvaatimusten mukaisesti. Taulukkoon on otettu vain ne litterat, joihin voi olla kirjallisuusselvityksen tulosten mukaan mahdollista soveltaa kierrätysrengasmateriaaleja. (++) käyttökelpoinen ja rakennetta parantava, (+) käyttökelpoinen ja korvaa toisen materiaalin, (-) ei sovellu käytettäväksi, (?) mahdollisesti käytettävä ja vaatii lisää tietoa tai jatkotutkimuksia.*

Litteran tunnus	Rengasrouhe [50...300 mm raekoko]	Rengasgranu- laatti [1...25 mm raekoko]
<b>10000 tierakenteet</b>		
11000.3 Melu ja tärinä	-	?
11140.1 Suodatinkerros, vedenläpäisevyys	+	+
11140.2 Suodatinkerros, erottaminen	+	-
11140.3 Suodatinkerros, routanousu ja routanousuero	++	?
11150.1 Roudaneristerakenteet, lämmönjohtavuus	+	+
11420 Kevennerakenne	++	++
11600.7 Luiskatäyte, vedenläpäisevyys	++	+
12000 Kuivatusrakenteet	+	+
12120.1 Salaojat, vedenkuljetuskapasiteetti	+	+
12120.2 Salaojat, vedenotto-kyky	++	++
12130 Kuivatusvesien keräys- ja johtamisrakenteet	+	+
12320 Hulevesiviemärit	+	+
13100 Meluesteet	++	-
13400 Tieympäristön verhoilu	?	++
16000 Kevyenliikenteen rakenteet	?	-
<b>20000 katurakenteet</b>		
21000.3 Melu ja tärinä	-	?
21140.1 Suodatinkerros, vedenläpäisevyys	+	+
21140.2 Suodatinkerros, erottaminen	+	-
21140.3 Suodatinkerros, routanousu ja routanousuero	++	?
21150.1 Roudaneristerakenteet, lämmönjohtavuus	+	+
21420 Kevennerakenne	++	++
22120.1 Salaojat, vedenkuljetuskapasiteetti	+	+
22120.2 Salaojat, vedenotto-kyky	++	++
22130 Kuivatusvesien keräys- ja johtamisrakenteet	+	+
22320 Hulevesiviemärit	+	+
123100 Meluesteet	++	-
<b>30000 ratarakenteet</b>		
31211 Routalevy	?	-
31230 Suodatinkerros	?	?
31211 Kevytsorapenger	?	?
31312 Siirtymärakenne ja -kiila	?	?
32100 Rata-alueen pintakuivatus	+	+
32200 Ratarakenteen kuivatus	?	?
32220 Sala- ja suoto-ojat	+	+
32230 Salaojakaivot	+	+
32250 Hulevesiviemärit	+	+





